



TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL

ÜLDMÕÕTMISTE PRAKTIKUMI TÖÖJUHENDID

II

TARTU 1979

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL

Üldfüüsika kateeder

ÜLDMÕÕTMISTE PRAKTIKUMI
TÖÖJUHENDID

II

Koostanud E.Tamm

TARTU 1979

Kinnitatud füüsika-keemiateaduskonna
nõukogus 17. novembril 1978

Eessõna

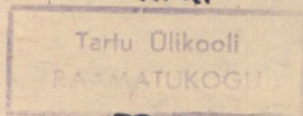
Käesolev kogumik on järg 1978. a. ilmunud kogumikule "Üldmõõtmiste praktikumi tööjuhendid" I, sisaldades füüsikaliste üldmõõtmiste juhendeid peamiselt massi, temperatuuri, aja ja elektriliste suuruste mõõtmiseks.

Tööjuhendite numeratsioon on ühtne kogumiku kahe osa jaoks.

Enamuse juhenditest on kirjutanud koostaja, kasutades suuremal või vähemal määral eeskujudena analoogiliste praktikumitööde kirjanduses avaldatud juhendeid. 9. juhendi on kirjutanud prof. V. Riives, 11. TPedI dotsent H. Tammet.

Kogumik on mõeldud kasutamiseks peamiselt füüsikaosakonna üliõpilastele esimesel semestril, kuid seda saavad kasutada ka peaaegu kõikide teiste teaduskondade üliõpilased, kes teevad füüsika praktikumi üldfüüsika kateedri juures.

Anh.



5537

KUSTUTATUD

9. NURKADE JA KAUGUSTE MÕÖTMINE TEODOLIIDIGA

9.1. Tööülesanne

Teodoliidi ehitusega tutvumine, teodoliidi ülesseadmine. Punktide koordinaatide määramine, nende plaani koostamine.

9.2. Töövahendid

Teodoliit TT-5, reguleeritava kõrgusega kolmjalgne statiiv koos ripploodiga, mõõdulint, raskus mõõdulindi pingutamiseks, veenõu lindi võnkumiste summutamiseks.

9.3. Teodoliidi ehitus ja ülesseadmine

Teodoliidi põhiosadeks on vertikaalne ja horisontaalne telg ning pikksilm, mille vaateväljas olev niitrist määrab kindla vaatesuuna - viseerimistelje (viseerimistelg läbib niitristi joonte ristumispunkti ja objektiivi keskpunkti). Pööramisega ümber kummagi telje on võimalik viia viseerimistelg mistahes suunale ruumis. Teljed on varustatud mõõteringidega pöördnurkade mõõtmiseks. Telgede orienteerimiseks on teodoliidil vesilood(id).

Teodoliidi põhiülesandeks on mingi suuna määramine ruumis teise ettevalitud põhisuuna suhtes. See suund antakse kahe pöördnurga (koordinaadi) abil; üks neist horisontaaltasandis (asimuut) ja teine vertikaaltasandis (kõrgus). Geodeesias ja navigatsioonis kasutatakse põhisuunana põhja (N)-suunda. Põhjasuuna (tegelikult magnetilise meridiaani suuna) kindlakstegemiseks on mõningatel teodoliitidel kompass. Kompassi magnetnõel on tavaliselt üles tõstetud ja kinnistatud, et vältida tema toetusteraviku vigastamist. Magnetnõel vabastatakse ainult orienteerimise ajaks.

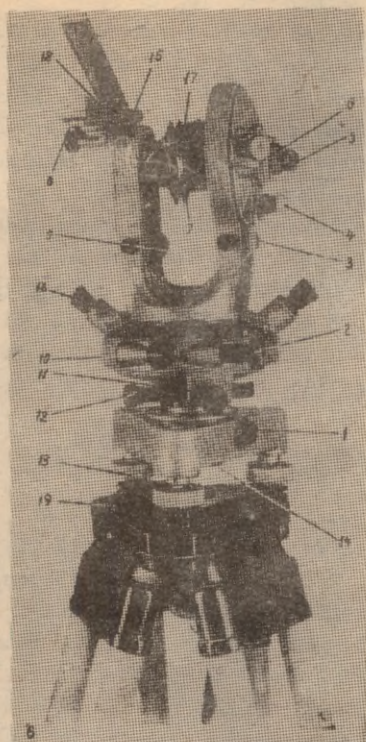
Teodoliit on rakendatav ka kõrguste vahede mõõtmiseks

(nivelleerimiseks), kauguste kaudseks määramiseks ja mitmesuguste teiste tehniliste ülesannete jaoks (näit. ehitiste vertikaalsuse kontrolliks).

Teodoliidi mõõteringid koosnevad kahest kontsentrilisest rõngast, mille keskpunkt ideaalsel juhul peaks asetsema vastava telje keskjoonel. Väline rõngas - limb - on jaotatud kogu ulatuses kraadideks ja nende alajaotusteks, sisenemisele rõngale - alidaadile - on kantud sümmeetriliselt ringi keskpunkti suhtes 2 nooniust. Võttes kahe nooniuse lugemitest keskmise, väldime nn. ekstsentrilisuse vea, mis tuleneb jaotatud ringi keskpunkti ja telje keskjoone mitteühitimisest. Kaasaegsetel teodoliitidel on see viga väike. Selle tõttu võetakse täielik lugem ainult ühe nooniuse järgi, teiselt aga ainult jaotise mürdosad (antud juhul minutid), mis keskmistatakse.

Teodoliidil TT-5 (joonis 9.1) pöörduvad koos telgede ja pikksilmaga vertikaalne limb ja horisontaalne alidaad, vertikaalne alidaad ja horisontaalne limb on aga seotud riista korpusega. Peale selle on horisontaalne limb vabastatav korpuse küljest ja ta võib pöörduda koos vertikaalse telje ja horisontaalse alidaadiga. Seda võimalust kasutatakse limbi orienteerimiseks, s. o. tema pööramiseks sellisesse asendisse, et viseerimistelje ühtimisel põhjasuunaga lugem horisontaalselt limbilt oleks $0^{\circ}00'$ ($180^{\circ}00'$). Sellisel juhul annab horisontaalse limbi lugem viseerimistelje mistahes asendi korral vastava suuna geodeetilise asimuudi. Kõik pöörded on kinnistatavad vastavate fiksaatorkruvide abil, misjärel vaatesuuna täpsustamine toimub peenliikumiskruvide abil.

Mõõtmiseks kinnistatakse teodoliit vastava kruviga reguleeritava kõrgusega kolmjalgsele statiivile, mille pealispind, kuhu toetub teodoliit, tuleb seada võimalikult horisontaalseks. Paljudel juhtudel on vaja teodoliit asetada maapinnal antud punkti kohale nii, et tema vertikaaltelje keskjoon läbiks antud punkti. Selleks on teodoliidi kinnituskohat statiivil varustatud ripploodiga, ja ta ise on piiratud ulatuses nihutatav.



Joonis 9.1. Teodoliit TT-5:

- 1 - kruvi teodoliidi kinnitamiseks kolmjalgalse külge;
- 11 - horisontaallimbi,
- 10 - horisontaalse alidaadi,
- 15 - vertikaallimbi kinnituskruvid;

- 12 - horisontaallimbi,
- 2 - horisontaalse alidaadi,
- 9 - vertikaallimbi,
- 3 - vertikaalse alidaadi peenliikumiskruvid.

- 16 - horisontaalringide,
- 5 - vertikaalringide lugemiluubid;

- 4 - vertikaalse alidaadi vesilood;

- 6 - aknad noonuste valgustamiseks;

- 17 - pikksilm;

- 7 - sihik viseerimistelje ligikaudseks suunamiseks;

- 18 - kompass;

- 8 - kompassi magnetnõela kinnituskruvi;

- 13 - jalgkruvi teodoliidi telgede orienteerimiseks;

- 14 - konks ripploodi riputamiseks;

- 19 - statiiv.

Teodoliit toetub statiivile kolme jalgkruviga, mille abil toimub teodoliidi täpne orienteerimine (nivellimine), s. o. vertikaaltelje vertikaalseks seadmine. Kui teodoliidi teljed on täpselt risti, siis sama võttega on saavutatud ka horisontaaltelje õige asend. Selle tingimuse mittetäitmine teodoliidi mehaanilise töötluse ebatäiuslikkuse tõttu põhjustab vea, mida nimetatakse kaldeveaks. Ei ole raske näidata, et horisontaalnurkade mõõtmisel võib lahti saada kaldeveast, aga ka nn. kollimatsiooniveast, mis on tingitud viseerimistelje mitteristiolekust horisontaalteljega, kui sama mõõtmist korrata kaks korda, pöörates vahepeal teodoliiti 180° võrra: vertikaalring teljest vaatleja suhtes alguses näiteks paremal (RP) ja siis - vasakul (RV). Muidugi tuleb samal ajal pöörata ka pikksilma 180° võrra (üle se- niidi).

Teodoliidi nivellimiseks, s.o. vertikaaltelje vertikaalseks seadmiseks kasutatakse vesiloodi. Teodoliidil TT-5 on kaks vesiloodi. Üks nendest, teodoliidi korpuse küljes, on väikese tundlikkusega ja on määratud ligikaudseks nivellimiseks. Seda vesiloodi võib lugeda õiendatuks, s. o. telg on vertikaalne, kui vesiloodi mull on keskel. Nivellimiseks piisab vesiloodi mulli keskeletoomisest esiteks kahe jalgkruvi suunas, pöörates ükskõik kumba kruvi, ja siis sellele suunale ristsuunas kolmanda jalgkruvi abil.

Täpseks nivellimiseks on kõrge tundlikkusega vesilood vertikaalringi alidaadi küljes. Vesiloodi õiendamiseks on alidaad koos vesiloodiga pööratav korpuse suhtes vastava kruvi abil. Vertikaaltelje vertikaalseks seadmine toimub analoogiliselt tasapinna horisontaalseks seadmisega reguleeritava vesiloodi ja kolme jalgkruvi abil, nagu on kirjeldatud vesiloodi gradueerimise juhendis [5, p. 8.3.3].

Et rakenduslikes ülesannetes kasutatakse teodoliiti põhiliselt horisontaalnurkade mõõtmiseks, siis sageli piirdu- takse tema ligikaudse nivellimisega, sest mõõdukas nivelli- misviga horisontaalnurki praktiliselt ei mõjuta. Horisondi- lähedaste vertikaalnurkade mõõtmiseks on küllaldane hoida alidaadi vesiloodi mull keskasendis alidaadi kruvi abil.

Teodoliidi pikksilma fokuseerimiseks tuleb eelkõige teravustada niitrist vaatleja pingutuseta (adapteerimata) silmale okulaari pööramise teel, ja alles siis teravustada mõõdetava eseme kujutis niitristile. Selleks nihutatakse objektiivi ja okulaari vahel asuvat fokuseerimislaätse, pöörates pikksilmal olevat rihveldatud rõngast. Silma külgsuunas liigutamisega kontrollitakse parallaksivea puudumist /5, p. 1.5/. Teodoliit TT-5 on teravustatav kaugustele 2 m - ∞ .

9.4. Mõõtmistäpsusest

Töötamisel teodoliidiga (nagu ka mistahes teise mõõteriistaga) tuleb meetoodika valida selliselt, et võimalikult vähendada meetoodilisi ja instrumendi ebatäpsusest tingitud süstemaatilisi vigu. Selleks peab aga teadma vigade allikaid. Nurga mõõtmisel teodoliidiga on vigade allikaid küllalt palju. Neist tähtsamad on: 1) teodoliidi ja nurga haardele seatavate märkide tsentreerimise ebatäpsus, 2) suunamise ebatäpsus, 3) teravustamise ebatäpsus (parallaktiline viga), 4) lugemi võtmise ebatäpsus (silma viga), 5) limbi ja nooniusse jaotiste valmistamise ebatäpsus (ringide lubatud põhiviga), 6) telgede mittehorisontaalsus ja mittevertikaalsus (nivellimise jääkviga), 7) kollimatsiooni viga, 8) kaldeviga, 9) ekstsentrilisuse viga, 10) juhusliku iseloomuga välismõjud (maapinna kõikumine, õhuvirvendus).

Neid vigu ei limiteerita eraldi. Kui teodoliit on kor-
rastatud passis antud meetoodika kohaselt, kui mõõtja enda
silma on nooniusse lugemiseks küllalt treenitud, siis võib
kõiki neid vigade allikaid vaadelda küllalt väikeste ja
nõrkade põhjustena. Väga paljude nõrkade veeallikate ole-
masolul on vigade esinemissagedus normaaljaotusega [1,
p. 28.8] ja üksiklugemi piirvea arvutamiseks on piisav, kui
me teame üksiklugemi standardhälvet σ . See limiteeritaksegi
standardiga ja antakse teodoliidi passis. Raamatust [1,
p. 14.9, tabel 14.9] võib leida andmed teodoliitide lubatud
vigade kohta. Tabeli teises reas on teodoliidi T-5 (see

kehtib ka TT-5 kohta) jaoks antud limbi lubatud põhiviga ühe nooniussega määratud lugemi jaoks. Põhiline on siin ekstsentrilisuse viga; kui lugem on leitud kahelt poolt võetud lugemite keskmisena (nagu ka käesolevas töös on ette nähtud), on ekstsentrilisuse viga üsna täpselt kõrvaldatud. Sellisel juhul järelejääv limbi jaotiste ja nooniuste valmistamisest tingitud süstemaatiline viga ei ületa 3". Kollimatsiooni- ja kaldevead töökorras teodoliidi juures on väikesed, nende kompenseerimist eespool kirjeldatud võttega ei nõuta.

Normaaljaotuse omadustest on teada [2, lk. 140], et tõenäosusega 99,7 % on kindel, et üksiktulemus (antud juhul üksiklugemi juhuslik viga) ei erine keskväärtusest (antud juhul lugemi tõelisest väärtusest) rohkem kui 3σ. Seega nurga α (kahe lugemi vahe) mõõtmisel võime piirveaks võtta

$$\Delta\alpha = 3 \sqrt{2} \sigma_0(\alpha) + 2 \Delta\alpha = 36''. \quad (9.1)$$

9.5. Töö käik

9.5.1. Vastavalt tööülesandele tuleb mõõta lakke kinnitatud kolme poldi otspunktide koordinaadid: horisontaaltasandis polaarkoordinaadid - kaugus r teodoliidi ülesseadmise punktist (jaamast) ja polaarnurk A - magnetiline asimuut; vertikaaltasandis - suhteline kõrgus ühe, suvaliselt valitud baaspoldi otsa suhtes. Nummendamise poldid, nr. 1 olgu baaspolt. Mõõtmiseks kinnitame kordamööda iga poldi otsa külge millimeeterjaotistega metallmõõdulindi, mida pingutab raskus. Lindi kõikumise summutamiseks asetame raskuse vette.

9.5.2. Teodoliidi ettevalmistamine mõõtmiseks

9.5.2.1. Seame teodoliidi statiivile juhendaja poolt näidatud punkti kohale.

9.5.2.2. Tutvume teodoliidi põhiosade ja kõigi reguleerimis- ning kinnitustetailidega eespool toodud kirjelduse ja joonise 9.1 abil. Harjutame lugemite võtmist limbidelt

nooniuste abil; veendume, et mõlema mõõteringi kahe nooniusse lugemite minuti- ja sekundiosade erinevus ei ületa 30 ''.

9.5.2.3. Nivellime teodoliidi.

9.5.2.4. Orienteerime limbi. Selleks vabastame horisontaalse alidaadi kinnituskruvi (10, joon. 9.1), seame ühe nooniusse järgi horisontaallimbi näiduks $0^{\circ}00'00''$, kinnitame alidaadi. Nüüd vabastame limbi (kruvi 11) ja kompassinõela (kruvi 8) ning pöörame teodoliiti seni ümber vertikaaltelje, kuni kompass näitab põhjasuunda. Fikseerime limbi. Kogu töö kestel ei tohi nüüd limbi asendit muuta. Kui pikksilm vaatab nüüd lõunasse, pöörame teda 180° üle seniidi. Selliselt orienteeritud limbilt võetud näidud on vastavate suundade magnetilised asimuudid (nurgakraadid tuleb lugeda nooniuselt, millele seadsime lugemi $0^{\circ}00'00''$).

NB! Siin ja edaspidi teeme reguleerimisi vabastatud kinnituskruvide korral käega, siis fikseerime kinnituskruvid ja teeme täppisreguleerimise peenliikumiskruvide abil.

9.5.2.5. Suuname pikksilma lindile, kasutades sihikut 7. Fokuseerime pikksilma lindile parallaksivabalt. Täpsustame suunamist.

9.5.2.6. Määrame viseerimistelje horisontaalse asendi lugemi h_0 . Vertikaalringi nullpunkt on asetatud nii, et lugem $0^{\circ}00'00''$ (või $180^{\circ}00'00''$) vastab ligikaudselt viseerimistelje horisontaalsele asendile. Null-lugemit täpsustame järgmiselt: seame ühele nooniustest lugemi $0^{\circ}00'00''$ ja võtame mõõdulindi lugemi ℓ_1^0 niitristi horisontaalkriipsu kohalt; pöörame pikksilma nii horisontaal- kui ka vertikaaltelje ümber 180° , asetame sama nooniusse lugemile $180^{\circ}00'00''$ ja võtame uue lugemi lindilt - ℓ_2^0 . Horisontaalasendile vastab ilmselt lindi lugem $\ell_0^0 = 1/2 (\ell_1^0 + \ell_2^0)$. Asetades niitristi lugemile ℓ_0^0 , saamegi vertikaalringilt lugemi h_0 . Selle minuti- ja sekundiosad võtame kahe nooniusse lugemite keskmisena.

9.5.3. Põhiline mõõtmisreeja. Iga punkti (poldi otsa) kohta mõõdame:

9.5.3.1. Lindi lugemi viseerimistelje horisontaalasendi korral ℓ_{on} . Nende lugemite vahed $\Delta \ell_{on} = \ell_{on} - \ell_{ol}$ annavadki vastavate punktide kõrguste vahed (n - punkti järjekorra number). Kõik lugemid lindilt kirjutame üles 0,5-mm täpsusega;

9.5.3.2. punkti kauguse horisontaalsuunas optilise kaugusmõõduri järgi. Optilise kaugusmõõduri moodustavad kaks horisontaalset niiti pikksilma vaateväljas ülal- ja allpool niitristi. Lindi lugemite vahest kummagi niidi kohal $\Delta \ell_n = |\ell_{1n} - \ell_{2n}|$ saamegi kauguse $r_n = 100 \Delta \ell_n$. Siin "100" on kaugusmõõduri konstandi väärtus (teodoliidi passist);

9.5.3.3. asimuudi. Seame niitristi vertikaalse kriipsu lindi ühele servale, võtame lugemid horisontaalringi mõlemalt nooniuselt (teiselt ainult minutid ja sekundid), arvutame lugemite minuti- ja sekundiosade keskmise - A. Asimuutide vahesid $\Delta A = A_n - A_1$ võime nimetada punktide suhteliseks asimuudiks baaspunkti (nr. 1) suhtes;

9.5.3.4. punkti täpsustatud kauguse jaamast horisontaalsuunas. Et optilise kaugusmõõduri täpsus on väike, siis mõõdame kaugused täpsemalt, kasutades mõõdulinti ja vertikaalringi. Pöörame pikksilma kaldasendisse, võtame lugemid vertikaalringilt h_n ja mõõdulindilt ℓ_n . Punkti kauguse horisontaalsuunas leiame valemist

$$r_n = |l_n - l_{on}| \cot |h_n - h_o|. \quad (9.2)$$

Kõrgusnurga $h_n - h_o$ valime võimalikult suure (vt. lisälüesande C lahendust).

Kauguste r_n piirvea leidmiseks on tarvis teada kõrgusnurga piirviga (vt. p. 9.4) ja lindilt võetud lugemite vahed $l_n - l_{on}$ piirviga. Viimase saamiseks liidame lindi kahekordsele lubatud põhiveale [1, tabel 15.6.8., III klassi lint] lugemi kahekordse ümardamisvea 0,5 mm.

9.5.4. Andmete töötlemine. Mõõtmisandmete alusel arvutame poltide otste vahelised kaugused (koosinusteoreemi ja suhtelisi asimuute kasutades), samuti nende piirvead.

Joonestame plaani, millel oleks märgitud jaam, põhja-suund ja kõik kolm punkti. Iga punkti juurde märgime tema numbri ja suhtelise kõrguse viisil $\frac{n}{\Delta \ell_{on}}$.

Märkus: Ajapuudusel võib (juhendaja loal) piirduda kahe punkti koordinaatide mõõtmisega.

9.6. Protokolli vormistamisest

Protokollis tuleb väga lühidalt kirjeldada teodoliidi mõõtmisteks ettevalmistamise operatsioone. Kindlasti tuleb anda kõigi protokolli järgnevas osas esinevate tähistest selgitus. Vertikaalringi null-lugemi h_0 määramise andmeid tabelisse ei kanta, nad võiks esitada järgnevalt:

$$h_1^0 = 0^{\circ}00'00'' \quad \ell_1^0 = \dots \text{ m}$$

$$h_2^0 = 180^{\circ}00'00'' \quad \ell_2^0 = \dots \text{ m}$$

$$\ell_0^0 = \dots \text{ m}$$

$$h_0^0 =$$

Põhilise mõõtmisseeria tulemused kanname tabelisse vormi 9.1. eeskujul

T a b e l 9.1.

Punkti nr.	ℓ_{on} /m/	Opt. kaugus-mõõtur			Asimuut			ℓ_n /m/	Kaldenurk		h_n
		ℓ_{1n} /m/	ℓ_{2n} /m/	$\Delta \ell_n$ /cm/	Lugemid nooniuste järgi		Lugemid nooniuste järgi				
					A						
					I	II	I		II		
1.											
2.											
3.											

Tabelile järgneb kauguste r_n arvutus optilise kaugus-mõõture ja kaldenurga järgi, siis punktide suhtelise kõrguse ja punktidevahelise kauguse arvutus, seejärel piirvigade arvutus. Protokolli lõpus on plaan.

9.7. Lisaülesandeid

9.7.1. Enne praktikumi:

A. Konstrueerida geograafilise asimuudi definitsioon (vt. keskkooli astronoomiaõpik või [3]).

B. Põhjendada piirvea valemi (9.1) saamist.

C. Tõestada, et valemist (9.2) kauguste r_n arvutamisel on r_n piirvea miinimumi kindlustamiseks kasulik valida kõrgusnurk $|h_n - h_0|$ võimalikult suur.

9.7.2. Pärast praktikumi:

D. Teha joonis optilise kaugusmõõtuuri tööpõhimõtte selgitamiseks.

9.8. Kirjandus

1. H. Tammet. Füüsika praktikum. Metroloogia. "Valgus", Tln., 1971.
2. E. Tiit. Matemaatilise statistika tabelid. I. TRÜ rota-print, Tartu, 1971.
3. Eesti nõukogude entsüklopeedia I. Tln., 1968.
4. N.A. Nazarov. Geodeesia. ERK, Tln., 1952, lk. 102-121.
5. Üldmõõtmiste praktikumi tööjuhendid I. Tartu, 1978.

10. KAALUMINE SUMMUTIGA ANALÜÜTILISEL KAALUL.

KEHA TÕELISE MASSI MÄÄRAMINE

10.1. Tööülesanne

Tutvumine summutiga analüütilise kaalu ehituse ja kaalumise meetoditega. Tutvumine vigade allikatega kaalumisel. Keha tõelise massi arvutamine (õhu üleslükkest tingitud parandi arvestamine).

10.2. Töövahendid

Analüütiline kaal A \bar{A} -200, vihtide komplekt, kaalutav keha (õhuga täidetud kinnijoodetud klaaskuul), mõttesilinder.

10.3. Analüütilise kaalu ehitus ja massi mõõtmise metoodika

Mõõtmisel suhtelist piirviga 10^{-5} kuni 10^{-6} (s. o. 10^{-3} % kuni 10^{-4} %) võimaldav II klassi analüütiline kaal on võrdõlgne kangkaal. Põhiliseks mõõteoperatsiooniks on tundmatu massiga keha massi mõõtmine tema võrdlemise teel etalonidest - vihtidest - koostatud sobiva komplekti kogumassiga.

Kaalu põhiosaks on jäik metallkang, mis oma väga kõvast materjalist - ahhaadist, kvartsist v. m. - prisma terava servaga toetub samast materjalist tasasele alusplaadile. Kaalukangi otstel on samasugused prismad kinnitatud toetusservaga ülespoole. Nendele servadele toetuvad tasased plaadid, mille küljes ripuvad kaalukaunid. Kogu see süsteem on suletud klaasustega kappi. Spetsiaalse seadme - arreetiiri - abil tõstetakse nii kang kui kaunid veidi üles, nii et prismad on plaatidest isoleeritud. Kaal vabastatakse arreetiirist ainult vahetult mõõtmise ajaks.

Tühjade või võrdsete koormustega koormatud kaussidega kaalukang peaks arreetiirist vabastamisel jääma rangelt ho-

risontaalsesse asendisse - tasakaaluseisu. Reaalselt saab ta aga alati arretiiirist vabastamisel väikese tõuke, mis viib ta tasakaaluasendist välja. Kaalukang on ehitatud nii, et süsteemi "kaalukang - kausid" masskese on madalamal kui toetusprisma serv, seega kujutab ta endast füüsilist pendlit ja hakkab võnkuma tasakaaluasendi ümber. Sealjuures võngub kaalukangi keskele kinnitatud pika vertikaalse osuti ots skaala ees, võimaldades kangi liikumist paremini jälgi-da.

Analüütilise kaalu täpsem kirjeldus ja teooria on an-tud kirjanduses [1, lk. 80 - 84]. Selgub, et kaal on seda tundlikum, mida lähemal on masskese toetusprisma servale. Aga siis on ka võnkeperiood suurem ja võnkumise sumbumine võtab rohkem aega. Seepärast määratakse tundliku kaalukangi tasakaaluasend tavaliselt võnkeamplituudide kaudu [1, lk. 75 - 79]. Selliselt määratud lugem on ühtlasi ka täpsem, sest hõõrdumise olemasolu tõttu prisma ja toetusplaadi va-hel võib kaalukang peatuda õigest tasakaaluasendist veidi kõrval.

Tänapäeval osutub võimalikuks nimetatud hõõrdumist küllalt väikeseks teha. Kaal varustatakse elektromagneti-liste või õhksummutitega võnkumise kiireks kustutamiseks. Õhksummuti koosneb kahest teineteise sisse käivast kausist. Üks kauss on kinnitatud liikumatult kaalu tugisamba külge, teine aga ripub koos kaalukaussiga. Kahe kausi vahele jääb kitsas õhupilu. Kaalukangi võnkumisel tekib ühes summuti-test alarõhk, teises ülerõhk; rõhumisjõud liikuvale kausile on alati suunatud liikumisele vastu. Läbi kitsa pilu kaus-side vahel voolab õhk, tekkivad hõõrdejõud on ka alati lii-kumisele vastassuunalised. Kõige selle tulemusena sumbub võnkumine väga kiiresti ja kangi tasakaaluasend määratakse skaala ette seisma jäänud osuti asendiga. Sealjuures tekib muidugi (hõõrdumise olemasolust tingituna) väike viga, mis on juhuslikku laadi. Selle vea ülemmäär on standardiga mää-ratud ja sõltub kaalu tüübist - lubatud variatsioon Δm [2, p. 18.1].

Kaalukang on võrdse massiga koormuste korral horison-

taalasendis tasakaalus ainult siis, kui tema õlad, s. o. otsmiste ja keskmise prisma servade vahelised kaugused on rangelt võrdsed. Mõõtmistäpsuse 10^{-5} saavutamiseks peab näit. 10 cm pikkuste õlgade korral nende võrdsus olema garanteeritud $1\mu\text{m}$ täpsusega. Ideaalset võrdsust pole kunagi võimalik saavutada, pealegi muutub õlgade pikkuste suhe kangi võnkumisel, sest prisma silindriliselt töödeldud toetus-serv veereb mööda plaati ja toetuspunkti asukoht muutub. Seepärast määrab standard ka mitte-võrdõlg-susest tingitud vea ülemmäära sõltuvalt kaalu täpsusklassist [2, p. 18.1].

Kaalumisel määratakse kõigepealt tühja kaalu tasakaaluasend - nulltäpp N_0 . Nulltäpp võib asuda skaala keskmisest joonest maksimaalselt 1 jaotise võrra kõrval, vastasel juhul tuleb kaalu reguleerida kangi otstes olevate mutrite keeramisega. Seejärel asetatakse kaalutav ese vasakule kaalukaussile, vihid aga paremale. Soovitav on keha eelnevalt kaaluda vähemtäpsel kaalul, siis on lihtsam valida sobivat vihtide komplekti. Vihtide valikut alustatakse alati suurematest vihtidest ja minnakse järkjärgult kõige väiksemani välja. Niimoodi koostatakse vajalik komplekt minimaalsest arvust vihtidest, mis kindlustab ka minimaalse vea. Vihtide valimisel ei tohi kaalu arretiiirist täielikult vabastada. Kangi mittetäielikul vabastamisel kaldub ta juba ühele poole ja on selge, kas paremal kaalukaussil tuleb vihtide massi vähendada (s. t. asendada viimasena asetatud viht järgmise, kergemaga) või suurendada (asetada peale järgmine viht).

Tavaliselt ei õnnestu olemasolevate vihtidega kaalu tasakaalustada - kaal on selleks liiga tundlik. Täpsemaks tasakaalustamiseks kasutatakse ratsurit. Ratsur on kindla massiga (antud juhul 10 mg) traadist kujund, mis asetatakse kaalukangi ülemisele servale teatud kaugusele toetusprisma servast [2, p. 18.9, 18.10]. Ratsuri raskusjõu õlg on väiksem kui kaalukaussile asetatud vihtide oma, seepärast on ta oma pöörava momendi poolest ekvivalentne kaalukaussile asetatud kergema vihiga. Ratsuri ekvivalentne mass m' määratakse seosest

$$m' = m \frac{\ell'}{\ell} = m\alpha, \quad (10.1)$$

kus m - ratsuri mass,

$\alpha = \frac{\ell'}{\ell}$ - ratsuri kauguse ja kaalu öla pikkuse suhe, mis määratakse kaalukangi ülemisel serval oleva skaala abil.

Et antud juhul $m = 10$ mg ja $\ell = 10$ jaotust, siis ilmselt $m'/\text{mg} = \ell' / \text{jaot.}$. Seega valemit (10.1) pole vaja kasutada - kaalukangil olev skaala on gradueeritud milligrammides.

Ratsuri abil oleks võimalik kaalu $\Delta\pi$ -200 korral seada koormatud kaalu tasakaalutäpp nulltäpiga ühtivaks nii, et mittetasakaalustatusest tingitud viga ei ületaks 0,1 mg. Aja kokkuhoiuks määratakse aga tavaliselt tasakaalutäpp N_1 , püüdmata teda täpselt N_0 -ga kokkulangevaks ajada (N_1 ei tohi N_0 -st erineda rohkem kui 5 jaotist), ja arvutatakse parand δM vihtide massi ja ratsuri ekvivalentse massi summale M' :

$$\delta M = \frac{1}{\alpha} (N_1 - N_0). \quad (10.2)$$

Siin α on kaalu tundlikkus - ühikulise massiga keha poolt tekitatud osuti hälve. $\frac{1}{\alpha}$ on jaotise hind (möödetakse tavaliselt ühikutes mg/jaot.). Kui skaala jaotised on nummerdatud vasakult alates, siis annab see valem parandi õige märgiga. Tundlikkuse määramiseks nihutatakse ratsurit kaalukangil, nii et kang võtab uue tasakaaluasendi; tasakaalutäpp N_2 peab asuma teisel pool N_0 . α arvutatakse siis

$$\alpha = \frac{N_2 - N_1}{m'' - m'}, \quad (10.3)$$

kus $m'' - m'$ on ratsuri nihkele vastav ekvivalentse massi muutus kaalukaasil, mis määratakse skaalalt kaalukangil. Kaalutava keha massi arvutamiseks saame valemeid (10.2) ja (10.3) arvestades:

$$M = M' + \delta M = M' + |m'' - m'| \frac{N_1 - N_0}{|N_2 - N_1|}. \quad (10.4)$$

Kaalumise lõpul määratakse kontrolliks uuesti nulltäpp. See ei tohi esialgselt erineda rohkem kui 0,2 jaot. võrra.

Tasakaalutäpid tuleb antud töös määrata 0,1 - 0,2 jaotise täpsusega.

Mõõtmistulemuse M piirviga määratakse vihtide summaarse lubatud põhivea [2, p. 18.8], kaalu mittevõrdõlgusest tingitud lubatud vea ja parandi δM piirvea summana. Parandi piirviga ei arvutata tavaliselt valemi (10.4) alusel, vaid võetakse võrdne maksimaalse lubatud variatsiooniga ja ratsuri ekvivalentse massi piirvea summaga. Variatsiooni on võimalik tasakaalutäppide korduvaid määramisi kasutades vähendada, nii et temast tingitud vea võib arvestamata jätta [2, p. 18.4]. Ratsuri ekvivalentse massi piirviga leitakse, korrutades ratsuri massi lubatud vea [2, p. 18.9] suhtega α ja liites kaalukangi skaala ebatäpsusest tingitud lubatud vea ($A\bar{A}$ -200 korral 0,2 mg). Asendusmeetodit kasutades on võimalik elimineerida ka mittevõrdõlgusest tingitud viga [1, lk. 94 - 95; 2, p. 18.4]. Sel juhul määrab M' piirvea ainult vihtide lubatud vigade summa.

Siin tuleb meeles pidada, et piirvea määramisel ignoreeritakse summas teistest 5 - 10 korda väiksemaid liikmeid.

10.4. Keha tõelise massi arvutamine

Et kaalumine toimub õhus, mõjub nii vihtidele kui kaalutavale kehale Archimedeese seaduse järgi üleslükkejõud ja kaalukangi tasakaaluolukorra (horisontaalseisu) korral ei ole kaalutava keha mass võrdne vihtide massiga. Kehtib ilmselt võrdus

$$M_t g - V_k \rho_g g = M g - V_v \rho_g g. \quad (10.5)$$

Siin M_t on keha tõeline mass (mida saaks määrata vaakumis kaaludes), M on kasutatud vihtide taandatud mass [2, p. 18.7] (koos parandiga valemi (10.4) järgi), ρ_g on õhu tihedus, V_k ja V_v - vastavalt keha vihtide ruumala. Kui kaalumise täpsus ei ületa 10^{-5} , siis võime keha ruumala V_k arvutamisel asendada $M_t \rightarrow M$ ja valem saab kuju

$$M_t = M \left[1 + \rho_{\delta} \left(\frac{1}{\rho_k} - \frac{1}{\rho_v} \right) \right]. \quad (10.6)$$

Siin ρ_k on keha tihedus, $\rho_v = 8000 \text{ kg/m}^3$ [2, p. 18.7]. Kui keha tihedus pole teada, on lihtsam määrata tema ruumala V_k . Siis valem (2) saab kuju

$$M_t = M + \rho_{\delta} \left(V_k - \frac{M}{\rho_v} \right). \quad (10.7)$$

Mõõtmistäpsuse kuni 10^{-5} korral võib õhu tiheduse ρ_{δ} arvutada valemist

$$\rho_{\delta} / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} / = 347 \frac{p/\text{mb}}{T/^{\circ}\text{K}}. \quad (10.8)$$

Kui M suhteline piirviga on väiksem kui 10^{-5} , tuleb valemite (10.6), (10.7) ja (10.8) asemel kasutada kirjanduses [1, lk. 91 - 94] antud täpsemaid valemeid.

10.5. Kaalu ja vihtide käsitlemise reeglid [2, p. 18.2, 18.6]

- 10.5.1. Kaalukangi ja -kausse ei tohi käega puudutada.
- 10.5.2. Kaalukaussidele pole lubatud panna midagi määrivat, märga ega kuuma.
- 10.5.3. Kaalutav keha asetatakse vasakpoolsele kaalukaussile, vihid parempoolsele.
- 10.5.4. Tuuletõmbuse ärahoidmiseks peavad kapi klaasuksed kaalumise ajal olema suletud.
- 10.5.5. Kaalu ülekoormamine on keelatud. Aḏ-200 lubatud maksimumkoormus on 200 g.
- 10.5.6. Vihte ei tohi käega tõsta. Vihtide käsitlemisest loe [2, p. 18.6]. Kaalukaussilt eemaldatud vihid asetatakse otse karpi tagasi, mingil juhul ei tohi neid lauale panna. Karbis peavad vihid asuma suuruse järjekorras.
- 10.5.7. Kaalu võib arreteerist vabastada ainult vahetult mõõtmise ajaks, kusjuures osuti ei tohi skaala piiridest välja minna. Vihte ja kaalutavat eset tohib asetada ainult arreteeritud kaalu kaussidele. Kaal

tuleb arreteerida sujuva liigutusega momendil, mil osuti läbib skaala nulli.

10.5.8. Kaalumise ajal ei tohi toetuda kaalu aluslauale.

Arreteerimata kaalu ei tohi tõugata ega pörutada!

10. 6. Töö käik

10.6.1. Tutvume põhjalikult analüütilise kaalu teooriaga kirjanduse [1, lk. 80 - 84] põhjal. Tutvume kaalu ehituse, tema üksikosade otstarbega.

10.6.2. Kontrollime kaalu klaasist alusel oleva ümmarguse vesiloodi abil kaalu samba vertikaalseisu, vajaduse korral seame kaalu loodi reguleeritavate jalgkruvidega.

10.6.3. Kontrollime, kas arreteeritud kaalu kõik kolm ahhaatprismat asuvad vastavate toetusplaatide kohal. Arreteerimiseadme küljes olevad teravikud peavad toetuma kangil ja kausihoidjatel olevatesse avadesse või toetusplattvormidele.

10.6.4. Harjutame kaalu arretiirist vabastamist ja arreteerimist. Mõlemad operatsioonid peavad toimuma aeglaste, sujuvate liigutustega, kaalukangi osuti ei tohi kordagi skaalast välja minna. Jälgime, kas kaalukang võngub vabalt, takistusteta; kui ei, teatame juhendajale.

10.6.5. Analüüsides valemit (5) raamatus [1, lk. 82], teeme kindlaks, missuguse detaili reguleerimisega on võimalik muuta kaalu AD-200 tundlikkust.

10.6.6. Määrame nulltäpi N_0 . Kui see on skaala keskelt kõrval rohkem kui 1 jaotise võrra, tuleb nulli korrigeerida. Seda teeb laborant või juhendaja. Variatsioonist tingitud vea vähendamiseks määrame N_0 vähemalt 3 korda.

10.6.7. Kaalume õõnsa klaaskuuli maksimaalse võimaliku täpsusega (kasutades ka ratsurit). Mõlemad tasakaalutäpid määrame vähemalt 3 korda.

10.6.8. Kontrolliks määrame uuesti 0-täpi (3 korda). Kui kolme lugemi keskmine erineb esialgsest kolme lugemi keskmisest vähem kui 0,2 jaot., loeme nulltäpiks 6 lugemi keskmise. Vastasel juhul tuleb kaalumist korrata.

10.6.9. Määrame mõõtsilindri abil uputamise meetodil klaaskuuli ruumala. Kuuli uputamiseks kasutame teravat eset (näit. hästi teritatud pliiatsit).

10.6.10. Arvutame klaaskuuli tõelise massi valemist (10.7) ja massi piirvea. Piirvea arvutamisel tuleb analüüsida, kas suuruste ρ_0 , ρ_v ja M piirviga valemi (10.7) II liikmes on tarvis arvestada ruumala V_k piirvea kõrval (viimane leitakse raamatust [2, p. 17.3] kui mõõtsilindri kahekordne lubatud piirviga).

10.7. Protokolli vormistamisest

Protokolli algusse kanname kõik arvutustes otseselt kasutatavad valemid ja nendes esinevate tähistete selgituse.

Edasi järgneb kõigi p. 10.6 ette nähtud kaalu kontrollimise operatsioonide tulemuste ja kõigi tehtud reguleerimiste kirjeldus. Kindlasti peab protokollis olema kirjas vastus p. 10.6.5 antud ülesandele.

Mõõtmisandmed kanname tabelisse vormi 10.1 järgi.

T a b e l 10.1.

Jrk. nr.	N_0 /jaot./	M' /g/	N_1 /jaot./	$|m' - m''|$ /g/	N_2 /jaot./	N_0 /jaot./
1.
2.	...	-	...	-
3.	...	-	...	-
Keskmine	...	-	...	-

$N_0 = \dots$

10.8. Lisaülesandeid

10.8.1. Enne praktikumi:

A. Arvutada 500 mg taandatud massiga alumiiniumvihi
($\rho_v = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ tõeline mass (vt. [1, p. 18.7]).

10.8.2. Pärast praktikumi:

B. Korgitüki ($\rho_k = 2,5 \cdot 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) ja plaatinatüki
($\rho_{pt} = 2,145 \cdot 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) massid osutasid õhus kaalumisel
võrdseiks - M. Kumba tõeline mass on suurem ja mitu korda?

10.9. Kirjandus

1. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. ERK, Tln., 1960.
2. H. Tammet. Füüsika praktikum. Metroloogia. "Valgus", Tln., 1971.

11. MÕÕTEKOLVI GRADUEERIMINE

11.1. Tööülesanne

Määrata kolvi maht kuiva ja märja kasutusviisi jaoks.

11.2. Töövahendid

Märgiga kolb, analüütiline kaal, vihid, destilleeritud vesi, termomeeter, nihik.

11.3. Vedeliku mahumõõdud

Mõõtekolbe ja mõttesilindreid (üldiselt - mõõtleid) on kahesuguseid [1, p. 17.1 - 17.3]: märga tüüpi ja kuiva tüüpi. Kõigil märga tüüpi mõõtlitel on märk "O" (отливной) ja kuiva tüüpi mõõtlitel märk "H" (наливной). Märke ei ole bürettidel, pipettidel ja koonilistel mensuuridel, kuna neid valmistatakse ainult märga tüüpi.

Kuiva tüüpi mõõtli nominaalmaht võrdub mõõtlis oleva vedeliku mahuga tingimusel, et vedeliku meniski puutetasand lõikab märkjoont ja temperatuur on 20°C.

Mõõtli õigeks täitmiseks tuleb see asetada horisontaalsele lauale. Vaatleja silm peab asuma vedeliku meniskiga samal kõrgusel, siis paistab meniski tasane osa serva poolt vaadates joonena.

Klaasi joonpaisumistegur on $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, ruumpaisumistegur seega $\approx 2,7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Siit on näha, et temperatuuri erinevus normaaltemperatuurist 5 K võrra põhjustab $\approx 0,014\%$ meetoodilise vea. Meetoodilist viga saab vajaduse korral vähendada temperatuuriparandi arvessevõtmisega.

Ei tohi unustada, et vedelike ruumpaisumistegurid on klaasi ruumpaisumistegurist umbes 10 korda suuremad. Seetõttu peab alati olema selge, millise temperatuuri korral on vaja vedeliku ruumala teada. Kui mõõtmine toimub sellest erineval temperatuuril, tuleb ruumala ümber arvutada.

Kuiva tüüpi mõõtliga saab mõõta ainult mõõtlisse sis-

sevalatava vedeliku hulka. Väljavalatava vedeliku ruumala on mõõtli nominaalruumalast väiksem, sest osa vedelikku jääb anuma seinte külge. Praktikas on aga enamasti vaja teada just väljavalatava vedeliku hulka. Sel puhul kasutatakse märga tüüpi mõõtleid.

Märga tüüpi mõõtli nominaalmaht võrdub märkjooneni täidetud mõõtlit väljavalatud vedeliku ruumalaga tingimusel, et temperatuur on 20°C ja mõõtlit hoiti ümberpööratud asendis 30 s (2 - 1 mõõtlit erandina 60 s). Märga tüüpi mõõtlitega saab õigesti mõõta ainult vett ja väikese kontsentratsiooniga vesilahuseid (on ilmne, et siirupi mõõtmisel tekiks üsna suur viga).

Kui märga tüüpi mõõtlit on vaja kasutada sissevalatava vedeliku mõõtmiseks, tuleb ta eelnevalt märjaks teha. Parem on aga kasutada võimaluse korral kuivi mõõtleid, kuna need on täpsemad.

Mõnel (vanemat tüüpi) mõõtekolvil on kaks märkjoont: üks märja, teine kuiva kasutusviisi jaoks.

11.4. Gradueerimismeetod

Märkjoonega varustatud kolbe gradueeritakse kaalu ja destilleeritud vee abil. Ruumala arvutamiseks vajalik destilleeritud vee tihedus normaalarõhul sõltuvalt temperatuurist on näidatud tabelis 11.1.

T a b e l 11.1

$t/^{\circ}\text{C}/$	$/\text{Mgm}^{-3}/$	$t/^{\circ}\text{C}/$	$/\text{Mgm}^{-3}/$	$t/^{\circ}\text{C}/$	$/\text{Mgm}^{-3}/$
12	0,99952	18	0,99862	24	0,99732
13	0,99940	19	0,99843	25	0,99707
14	0,99927	20	0,99823	26	0,99681
15	0,99913	21	0,99802	27	0,99654
16	0,99887	22	0,99780	28	0,99626
17	0,99880	23	0,99757	29	0,99597

Kaalutakse kuiv kolb ja märkjooneni veega täidetud kolb. Masside vahe annab vee massi, sellele arvutatakse õhu üleslükkest tingitud parand (s. t. leitakse vee tõeline mass) (vt. käesoleva kogumiku töö nr. 10). Arvutamisel võib kasutada täpsust kuni 10^{-5} garanteerivaid valemuid. Arvutatakse vee ruumala katse temperatuuril. See annab kolvi nominaalruumala kuiva kasutusviisi jaoks. Et teada sama kolvi nominaalruumala märja kasutusviisi korral, tuleb kaaluda märg kolb. Täidetud kolvi ja märja kolvi masside vahe järgi leitakse nominaalruumala märja kasutusviisi jaoks.

11.5. Töö käik

11.5.1. Seame kaalu loodi ja kontrollime tema korrasolekut (vt. p. 10.6.2, 10.6.3, 10.6.6).

11.5.2. Kaalume tühja kolvi juhendi nr. 10 kohaselt. Nulltäpi määrame 3 korda, kõik tasakaalutäpid aga 1 kord (ka edaspidi).

11.5.3. Täidame kolvi märkjooneni destilleeritud veega. Vee nivoo (meniski puutepinna) ja märkjoone vaheline erinevus ei tohi ületada 0,2 mm. Täpse reguleerimise juures võib vett välja võtta filterpaberi ribaga. Kolvi suu peab olema kuiv (vajaduse korral kuivatada filterpaberi ribaga). Mitte puudutada kolbi väljastpoolt märgade või määrdunud kätega!

11.5.4. Kaalume veega täidetud kolvi, püüdes jällegi saavutada maksimaalset täpsust, mida võimaldavad kaal ja vihid. Kohe pärast kaalumist asetame kolbi termomeetri ja registreerime vee temperatuuri. Samal ajal registreerime laboratooriumi õhu temperatuuri ja rõhu.

11.5.5. Kallame kolvi tühjaks, hoides seda (pärast suurema veehulga väljavoolamist) kummuli 30 s, ja kaalume märja kolvi.

11.5.6. Täidame kolvi uuesti, tühjendame, hoides kummuli 10 s ja kaalume. Kontrollime nulltäppi (3 korda).

11.5.7. Arvutame järgmised suurused:

- a) kolvi nominaalmahu kuiva kasutusviisi korral (koos piirveaga) katse temperatuuril;
 - b) kolvi nominaalmahu märja kasutusviisi korral (koos piirveaga) katse temperatuuril;
- õhu üleslükke parandi arvutame vee massile (s. t. kahe mõõtmistulemuse vahele);
- c) mahu mõõtmise suhtelise vea vedelikunivoo kõrguse hälbe korral $0,2 \text{ mm}$ (kolvi kaela läbimõõdu märkjoone kohal teatab preparaator või juhendaja);
 - d) väljavalatud vedeliku mahu suhtelise vea 10 s kumutamisaaja korral;
 - e) suhtelise vea, mille me oleksime teinud, kui ruumala arvutamisel oleksime vee tiheduseks lugenud täpselt $1 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$;
 - f) suhtelise vea, mille me oleksime teinud õhu üleslüket ignoreerides (kuiva kasutusviisi korral).

Alapunktides a) ja b) nõutud piirvigade arvutamiseks tuleb hästi tähelepanelikult läbi lugeda käesoleva kogumiku 10. juhendi p. 10.3 viimane lõik ja raamatust [1] p. 18.4. Otsustame, kas mittevõrdõlguse viga ja variatsioonid on tarvis arvestada. Veendume, et vee tõelise massi arvutamisel valemist (10.6) parandusliikme piirviga on määratud põhiliselt õhu tiheduse ρ_g piirveaga.

11.6. Protokolli vormistamisest

Protokolli algusesse kanname kõik arvutustes otseselt kasutatavad valemid ja nendes esinevate tähistete selgituse. Vastavad valemid leiame käesoleva kogumiku 10. juhendist (10.4, 10.6, 10.8), ülejäänud tuletame ise (vt. lisäülesanne A). Nelja mõõtmistulemuse eristamiseks kasutame valemis (10.4) esinevatel suurustel indeksit $i = 1, 2, 3, 4$ (M_i , M'_i jne.). Selgitustes peab olema toodud indeksi kõikide väärtuste tähendus.

Mõõtmistulemused kanname tabelisse vormi 11.2 eeskujul. Milleks on tabelis indekseid 1 ja 4 korral jäetud 4 rida ruumi?

Tabelisse kanname ka arvutatud masside väärtused (viimane veerg).

Lõppvastused (p. 11.5.7 nõutud suurused) esitame protokollis lõpus tulbana.

T a b e l 11.2

1	N_0 /jaot./	M_1 /g/	N_{11} /jaot./	$|m_1' - m_1|$ /g/	N_{21} /jaot./	N_0 /jaot./	M_1 /g/
1	...	...	...	...	...	-	-
	...	-	-	-	-	-	-
	...	-	-	-	-	-	-
	$\overline{N_0} =$	-	-	-	-	-	...
2	-	...	...	...	...	-	...
3	-	...	...	...	...	-	...
4	-	...	...	...	...	...	-
	-	-	-	-	-	...	-
	-	-	-	-	-	...	-
	-	-	-	-	-	$\overline{N_0} =$	...

11.7. Lisaülesandeid

11.7.1. Enne praktikumi:

A. Tuletada valemid p. 11.5.7 alapunktides c, e, f nõutud suhteliste vigade arvutamiseks. Kõik kasutatud tähised viia ühtsesse süsteemi teistes kasutatavates valemites esinevate tähistustega.

B. Kui kolvil on kaks märkjoont, üks kuiva, teine märja kasutusviisi jaoks, kumb neist on ülalpool?

11.8. Kirjandus

1. H. Tammet. Füüsika praktikum. Metroloogia. "Valgus", Tln., 1971.

12. AEGRELEE GRADUEERIMINE

12.1. Tööülesanne

Elektriliste sekundkellade ehituse ja kasutamisega tutvumine. Lihtsaima aegrelee valmistamine ja gradueerimine, Sagedusparandi arvestamine.

12.2. Töövahendid

Sekundkell NB-53I või II-14M, aegrelee (stend), ühendusjuhtmed, voltmeeter, sagedusmõõtur, tester.

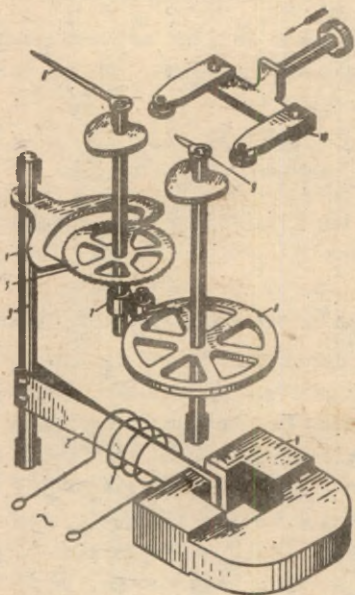
12.3. Elektrikellade ehitus. Aegrelee tööpõhimõte

12.3.1. Sekundkell NB-53I on vibratsioonsüsteemiga mõõteriist, mille juures aja mõõtmiseks kasutatakse 50-Hz vahelduvpinge perioodi konstantsust. Sekundkella töö põhimõtet selgitab joonis 12.1.

Ergutusmähist (1) läbiva vahelduvvoolu magnetvälja toimel magneetub pehmeterasest keeleke (2), mis asub püsivmagnetipooluste vahel. Keeleke hakkab püsivmagnetipooluste vahelise vahelduvvoolu sagedusega, pannes ühtlasi võlli (3) abil võnkuma ka ankru (11), mis keelekese täisvõnke aja jooksul annab hammasrattale (5) kaks tõuget. Hammasrattal on 100 hammas, ta teeb ühe täispöörde sekundis, liikudes hüpsetega $1/100$ s ja pannes liikuma ka suure osuti (6). Frikttsioon- (hõõrdumis-) ülekande (7, 8) abil pannakse liikuma väike osuti (9), mille pöörlemiskiirus on 10 korda väiksem suure osuti omast. Kangi (10) abil viiakse osutid enne mõõtmist nullasendisse.

Sekundkella toiteks võib kasutada 220-V või 110-V vahelduvpinget. Olemasolevat nelja klemmi tuleb kasutada vastavalt numbrilaul toodud skeemile. Pinge antakse tähekesega klemmi (esimene paremalt) ja klemmide "220" või "110" vahele vastavalt võrgupingele. Sealjuures läheb vool ergutusmähisesse läbi eeltakistite. Ergutusmähise enda otsad on

välja toodud klemmide "K" ja "Ж" alla, neid klemme võib kasutada kella peatamiseks mõhise lühistamise teel. Kell käivitatakse voolu lülilise või väljalülimisega.



Joon. 12.1. Sekundkella ПБ-53А skeem.

Numbrilaua maht on 10 s. Väike osuti näitab täissekundideid, suur aga kümnendikke ja sajandikke. Ajavahemike $t > 10$ s mõõtmiseks tuleb visuaalselt ära lugeda väikese osuti täisringide arv. Mõõteriista lubatud põhiviga on 0,03 s ajavahemike $0 < t \leq 3$ s korral ja 0,05 s $t > 3$ s korral. Kui tehakse mitu üksteisele järgnevat mõõtmist, nullistamata vahepeal osuteid, siis summaarse näidu viga on võrdne üksikute vigade summaga.

On selge, et kella näit sõltub võrdeliselt toitepinge sagedusest, seepärast võib nominaalsest erineva sageduse korral õige mõõtmistulemuse arvutada valemist

$$t = t' \frac{50}{f}, \quad (12.1)$$

kus t - mõõdetav ajavahemik,
 t' - kella näit,
 f - vahelduvpinge sagedus, mis mõõdetakse hertsmeetriga.

12.3.2. Sünkroonsekundkell II-14M on sünkroonmootori ja elektromagnetilise siduriga varustatud ajamõõtur. Sünkroonmootori võlli pöörlemissagedus on rangelt võrdeline vahelduvpinge sagedusega. Mootor lülitatakse mõõtmiste ajaks pidevalt võrku (klemmid 1 ja 2 korpusel). Elektromagnetilise siduri ahelas (klemmid 3 ja 4) voolu lüümisega ühendatakse mootori võlliga hammasratasülekande süsteem, mis paneb liikuma osutid. Nii mootori kui ka siduri toiteks kasutatakse vahelduvpinget 50 Hz, 220 V.

Kellal on 3 osutit, mis võimaldavad numbrilaua 10-minutilise mahu juures saada lugemeid 0,01 s täpsusega. Kella lubatud põhiviga nominaalsagedusel ongi 0,01 s. Parandatud mõõtmistulemuse arvutamiseks toitepinge 50 Hz-st erineva sageduse korral tuleb kasutada valemit (12.1).

12.3.3. Sekundkelli II-B-53II ja II-14M kasutatakse nende küllalt kõrge mõõtmistäpsuse tõttu põhiliselt automaatses ajamõõtmise süsteemides, kus kella käivitamine ja seiskamine toimub automaatselt, tavaliselt elektromagnetreele kontaktide kaudu. Neid võib aga kasutada ka käsistoppkelladena, kui nad varustada välise lülitiga kella käivitamiseks ja seiskamiseks. Mõlema kasutusviisi korral arvutatakse mõõdetud ajavahemiku piirviga Δt valemist

$$\Delta t = \Delta^0 t + E_f t + \Delta^2 t \quad (12.2)$$

Siin $\Delta^0 t$ on sekundkella lubatud põhiviga, E_f on võrgusageduse mõõtmise suhteline piirviga, $\Delta^2 t$ - automaadi või mõõtja reaktsiooniaegade erinevusest käivitamisel ja seiskamisel tingitud vea võimalik ülemmäär (reaktsiooniviga). E_f loetakse tavaliselt võrdseks kasutatud sagedusmõõturi lubatud suhtelise veaga. Kui aga (vähemtäpse mõõtmise

korral) võrgusagedust ei mõõdetata ja loetakse ta võrdseks 50 Hz-ga, siis $E_f = 0,01$ (riikliku standardi nõuete kohaselt hoitakse Nõukogude Liidus võrgusagedus paigas 1-% täpsusega). Mõõtja reaktsiooniaegade vahe käsitsimõõtmisel (nagu reaktsiooniaeg isegi) on juhuslik suurus, mille võimalik ülemmäär valitud usaldatavuse korral on igal inimesel individuaalne, sõltudes ka närvisüsteemi seisundist. See pärast tuleks käsitsimõõtmisel teha korduvaid mõõtmisi ja arvutada tulemuste aritmeetilise keskmise juhusliku vea ülemmäär (vt. [1, p. 35.2, 35.3, 35.4]); see ongi Δ^t . Kui ignoreerida närvisüsteemi seisundi muutusi, võib piirduda ühekordse mõõtmise tulemusega, hinnatud varem tehtud mõõtmisseeria põhjal reaktsiooniaegade vahe jaotuse ruutkeskmist hälvet. Füüsika praktikumis võib Δ^t arvutada käesoleva kogumiku 1. töös p. 1.6 ÷ 1.8 leitud ruutkeskmise hälbe hinnangu $s_{\Delta t}$ kaudu ($s_{\Delta t}$ on taskuraamatusse üles kirjutatud!). Eeldades, et reaktsiooniaegade vahe jaotus on normaaljaotus, saame 95-% usaldatavuse korral

$$\Delta^t \approx 2 s_{\Delta t}$$

(vt. ka p. 8.4. käesolevas kogumikus).

12.3.4. Aegrelee on automaatseade vajaliku (täavaliselt) reguleeritava) ajavahemiku etteandmiseks. Selle ajavahemiku jooksul võib näiteks olla sisse lülitatud mingi töömehanism (fotosuurendi lamp).

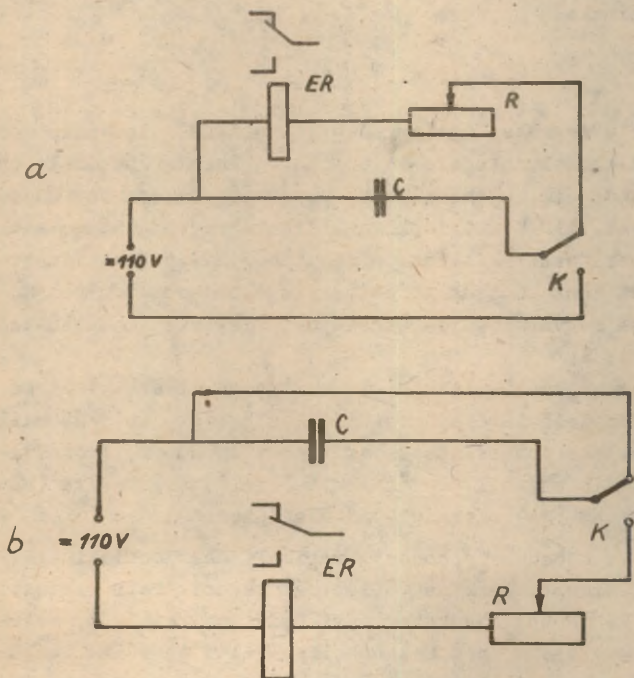
Lihtsaima aegrelee võib ehitada elektromagnetreleest ER, kondensaatorist C, takistist R ja alalispinge allikast (joon. 12.2).

Elektromagnetrelee ankru liikumapanemiseks on tarvis läbi relee mähise lasta vool, mille tugevus ületab teatud minimaalse väärtuse. Nimetame selle relee käivitusvooluks I_k . Tõmbunud ankur vabaneb ja liigub vedru toimel algasendisse tagasi teatud väiksema voolutugevuse I_0 korral.

Kondensaatori laadumine üle takisti R pingeni U toimub kindla ajavahemiku jooksul, kusjuures pinge kondensaatoril kasvab ja vool läbi takisti kahaneb ajas eksponentsiaalse seaduse järgi. Kui laadida kondensaatorit läbi relee

mähise nii, et algmomendil $I > I_k$, siis on rele e ankur tõmbunud teatud ajavahemiku jooksul, kuni $I > I_0$. Relee kontaktidega ühendatud vooluring (tarbija) on selle aja jooksul kas suletud või katkestatud, sõltuvalt sellest, milline on kasutatud kontaktide normaalasend (s. o. nende seis vabastatud ankru korral).

Aegrelee ehitamisel võib kasutada ka laetud kondensaatori tühjenemist läbi rele e mähise. Joonisel 12.2 on esitatud aegrelee skeemi kaks varianti, mis põhinevad vastavalt kondensaatori laadumisel (a) või tühjenemisel (b) läbi takisti.



Joon. 12.2. Lihtsaima aegrelee skeemid.

Ajavahemikku, mille jooksul relee ankur kirjeldatud skeemis on tõmbunud, saab reguleerida kolmel viisil:

- 1) pinge muutmisega, milleni kondensaator laetakse;
- 2) kondensaatori mahtuvuse muutmisega;
- 3) relee mähisega järjestikku lülitatud takisti takistuse muutmisega.

Missugust reguleerimismoodust kasutatakse joonisel 12.2 esitatud skeemides?

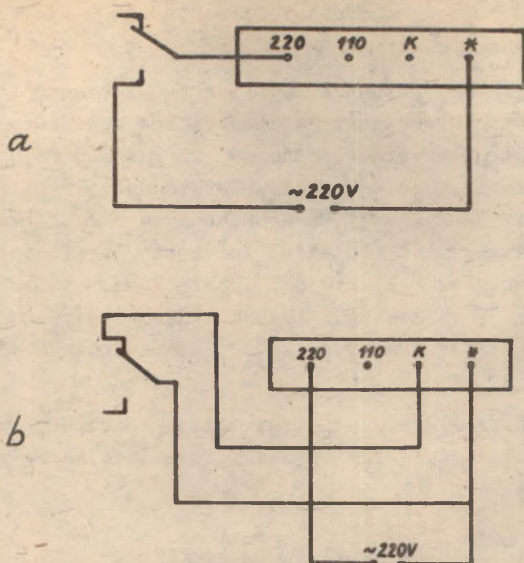
Skeemis reguleeritava suuruse etteantud väärtustele (reguleerimisnupu vastavatele asenditele skaalal) vastavate lülitusaegade katselist määramist nimetatakse aegrelee gradueerimiseks.

12.4. Töö kõik

12.4.1. Aegrelee ehitamiseks vajalikud elemendid on paigutatud ühisele alusele (stendile). Enamik ühendusi on tehtud stendi all, olemasolevate ühenduste skeem on kujutatud alusel. 110-V alalispinge allikaks on võrgupinge alaldi, reguleeritava takistina on kasutatud süsipotentsiomeetrit. Pärast igat töötüklit on tarvis kondensaator tühjendada (skeem a) või laadida (skeem b). Selleks kasutatakse ümberlülitit K.

Tutvume põhjalikult stendi ehitusega, teeme kindlaks, millised joonisel 12.2 kujutatud ühendustest on stendil tehtud. Selleks joonestame skeemi paberile ümber, joonestame juurde kõik stendil olevad kruviklemmid, märgime ära (näiteks teise värviga) olemasolevad ühendused.

12.4.2. Koostame juhendaja valikul ühe joonisel 12.2 toodud skeemidest. Tarbija vooluringi skeemi kaks varianti sekundkella ПВ-53П jaoks on esitatud joonisel 12.3, valime neist suvaliselt ühe. Sekundkella П-14М on võimalik lülitada vaid skeemivariandi a järgi, kusjuures joonisel kujutatud klemmide "220" ja "ж" osas on sünkroonkella siduri klemmid 3 ja 4.



Joon. 12.3. Sekundkella NB-53A lülitusskeemid.

12.4.3. Mõõdame reguleeritava takisti nupu kõigis asendites skaalal relee ankru tõmbumise aja n (vähemalt 5) korda, seades igakord nupu uuesti valitud kriipsule. Et kondensaatori tühjenemine (skeem a) või laadumine (skeem b) pärast igat töotsüklit ei toimu ka mitte silmapilkselt (skeemis on tegelikult $300-\Omega$ takisti, mida joonisel pole kujutatud), siis tuleb iga mõõtmise vahel hoida ümberlülitit teises asendis vähemalt 5 sekundit. Registreerime sagedusmõõturilt võrgusageduse, mõõdame voltmeetriga pinga alaldi klemmidel (klemmid "+110" ja "-110" stendil). Võtnud ära välised ühendusjuhtmed, mõõdame oommeetriga aegrelee ahela kogutakistuse R minimaalse ja maksimaalse väärtuse (potentsiomeetri nupu äärmistes asendites) relee stendi paremal äärel olevate kõige alumise ja kõige ülemise klemmi vahelt.

Kirjutame stendilt ära kondensaatori mahtuvuse C ja voolutugevuse I_0 väärtused.

12.4.4. Arvutame potentsiomeetri nupu iga asendi korral saadud mõõtmistulemustest aritmeetilise keskmise \bar{t} , valemi (12.1) järgi arvutame mõõdetud võrgusageduse järgi täpsustatud keskmised \bar{t} . Gradueerimistulemuste \bar{t} piirvead arvutame valemi (12.2) järgi. Reaktsioonivea $\Delta^2 t$ arvutame igas punktis tehtud viie mõõtmise tulemuste järgi Student-Lordi testi kasutades [1, p. 35.3]. Selleks arvutame igas punktis suurima ja väikseima tulemuse vahe (haarde) w_n , tabelist 35.3 [1] leiame arvu $t_{95\%,n}^{(w)}$ ja korrutame: $\Delta^2 t = w_n \cdot t_{95\%,n}^{(w)}$.

12.4.5. Ehitame gradeerimisgraafiku koos piirvea koridoriga. Katseandmete järgi graafikute ehitamise reegleid vt. [1, p. 37].

12.5. Protokolli vormistamisest

Protokolli algusesse kirjutame kasutatavad arvutusvalemid ja nendes esinevate sümbolite selgituse. Seejärel joonestame aegrelee kasutatud skeemi, samuti sekundkella lülitusskeemi. Katseandmed ja arvutustulemused korraldame tabelisse vormi 12.1 järgi. Tabeli vorm on esitatud viie mõõtmistulemuse jaoks igas punktis ($n = 5$).

T a b e l 12.1

Potentsiomeetri nupu asend	Relee ankru tõmbumisajad /s/								
	t_1^i	t_2^i	t_3^i	t_4^i	t_5^i	\bar{t}^i	\bar{t}	w_5	$w_5 \cdot t_{95\%,5}^{(w)}$
1									
2									
3									
⋮									
⋮									

$$t_{95\%,5}^{(w)} = \dots$$

Gradueerimisgraafiku ehitame protokollilehe . suurusele millimeetripäberi lehele.

Lõpuks esitame lisaülesannete lahendused.

12.6. Lisaülesanded

12.6.1. Pärast praktikumi:

A. Nii kondensaatori laadumisel kui tühjenemisel avaldub voolutugevuse I sõltuvus ajast t valemiga

$$I = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (12.3)$$

kus U_0 - pinge kondensaatoril enne tühjenemist (või pärast laadumise lõppu); siin võrdne alaldi klemmipingega (mõõta voltmeetriga!);

C - kondensaatori mahtuvus;

R - tühjenemis- (laadumis-) vooluringi kogutakistus.

Kasutades töös mõõdetud või stendilt üleskirjutatud väärtusi (vt. p. 12.4.3), arvutada relee ankru maksimaalne ja minimaalne tõmbumisaeg kasutatud seadmes. Võrrelda katsetulemustega.

B. Kui meie aegrelee kasutamise ajal on võrgusagedus muutunud, võrreldes gradueerimise ajaga, kas ja kuidas see mõjutab aegrelee tõmbumisaega?

C. Kas reaktsiooniviga Δt antud katses peegeldab ainult seadme reaktsiooniaja juhuslikkust või sisaldab ta ka mõne muu veaallika poolt põhjustatud komponenti? Milline on see allikas?

D. Graafikut kasutades leida potentsiomeetri nupu asend, mille korral $t = 0,47$ s. Kui suur on seal relee ankru tõmbeaja piirviga Δt ?

12.7. Kirjandus

1. H. Tammet. Füüsika praktikum. Metroloogia. "Valgus", Tln., 1971.

13. TERMOPAARI VALMISTAMINE JA GRADUEERIMINE

13.1. Tööülesanne

Termopaari valmistamine elektrolüüdis keevitamise teel ja selle gradueerimine tuntud temperatuuride järgi.

13.2. Töövahendid

Tükk konstantaan- ja kaks tükki vasktraati, anum salmiasagi küllastatud vesilahusega, eraldustrafo, puhtad metallid: tina, seatina, vismut, tsink, 5 tiiglit, soojusisolatsiooniga jäänõu, puhas (destilleeritud) vesi, jää, elektriahi, statiiv ahju ja termopaari jootekohtade kinnitamiseks, isekirjutav potentsiomeeter, juhtmed.

13.3. Termoelektriline efekt.

Termopaar kui temperatuuri andur

Kui moodustada suletud vooluring kahest erinevast metallist, mis on kahes punktis kokku joodetud (keevitatud, viidud lihtsalt kokkupuutesse) ja tekitada jootekohtades temperatuuride erinevus, ilmneb ahelas vool, mille põhjuseks on erineval temperatuuril olevate jootekohtade püsiv potentsiaalide vahe - termoelektromotoorjõud. Nähtust nimetatakse termoelektriliseks efektiks (Seebecki efektiks).

Termoelektrilist efekti kasutatakse temperatuuri mõõtmiseks. Selleks otstarbeks tehakse kahe jootekohaga vooluahel peenikestest traatidest, nn. termopaar. Termopaaril on olulisi eeliseid elavhõbedatermomeetri ees: lihtne konstruktsioon, mehaaniline ja termiline vastupidavus, väga lai mõõtepiirkond, jootekoha väikestest mõõtmetest ja väikesest soojusmahtuvusest tingitud võimalus mõõta väga väikeste kehade või kiiresti muutuvaid temperatuure, võimalus jälgida temperatuuri väärtust eemal mõõtmiskohast või seda automaatselt üles kirjutada. Termopaari puuduseks võib mõninas mõttes lugeda seda, et temaga peab komplektis olema

mõõteriist elektromotoorjõu, pinge või voolu mõõtmiseks. Termopaar pole iseseisev mõõteriist, vaid andur-seade, mis muundab mõõdetava suuruse - temperatuuri - temaga üheselt seotud suuruseks - termoelektromotoorjõuks.

Paljude termopaaride elektromotoorjõud on ligikaudu võrdeline jootekohtade temperatuuride vahega. On aga ka termopaare, mille elektromotoorjõud temperatuuri tõusuga esialgu suureneb, hakkab siis teatud temperatuurist alates vähenema ja teataval kindlal temperatuuril muudab märgi (näiteks W-Mo, Fe-Cu, Ni-uushõbe jm.).

Tehnikas kasutatakse peamiselt järgmisi termopaare:

Cu-konstantaan	kuni	500 °C,	kusjuures	E_{500}	= 26,8 mV
Kromell ¹ -kopell ²	"	800 °C,	"	E_{800}	= 66,4 "
Fe-konstantaan (40 %					
Ni, 60 % Cu)	"	900 °C,	"	E_{900}	= 50,9 "
Ni-CrNi (12,3 % Cr)	"	1100 °C,	"	E_{1100}	= 41,3 "
Kromell-alumell ³	"	1300 °C,	"	E_{1300}	= 52,41 "
Pt-PtRh (normaal)					
(10 % Rh)	"	1600 °C,	"	E_{1600}	= 16,65 "
W-Ta	"	2500 °C,	"	E_{2500}	= 32,3 "

Tehnilise termopaari ehitus on järgmine: kahest eri metallist 0,5 - 1,5-mm läbimõõduga traadid on otsapidi kokku joodetud. Jootekohast alates on traadid isoleeritud mingi temperatuurikindla keraamilise ainega (harilikult kvartsiga SiO_2 või korundiga Al_2O_3). Mõlemad traadid ühes isoleertoruga on paigutatud kaitsetorusse, mille ülesandeks on kaitsta jootekohta ja traatide isolatsiooni mehaaniliste viigastuste ning samuti mõõdetavate keskkondade keemiliste ja elektriliste mõjude eest. Eriti kõrgete temperatuuride puhul, kus kasutatakse W-Ta-termopaari, valmistatakse isolatsioon ja kaitsetoru tsirkooniumoksiidist ning termopaar ise on inertses gaasis ülerõhu all (harilikult argoon).

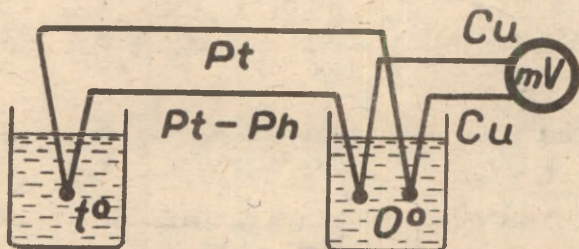
¹ Kromell 90 % Ni, 9,7 % Cr, 0,3 % Si.

² Kopell: 43 - 44 % Ni, 56 - 57 % Cu.

³ Alumell: 94,8 % Ni, 2 % Al, 2 % Mn, 1 % Si, 0,2 % Fe.

Vähemtäpsetel mõõtmistel kasutatakse sageli nn. ühe jootekohaga termopaare. Termopaari traadid on vaid ühes punktis kokku joodetud, teised otsad ühendatakse otse millivoltmeetri, mikroampermeetri või kompensaatoriga (potentsiomeetriga) (vt. käesoleva kogumiku 16. juhend). Sel juhul on teiseks "jootekohaks" ühendus mõõteriista klemmidega, mille temperatuur võrdub toatemperatuuriga. Toatemperatuuri kõikumised suurendavad siin mõõtmisviga.

Kui on tarvis suuremat täpsust, siis joodetakse termopaari traatide teised otsad kokku vaskjuhtmetega, need jootekohad asetatakse termostaati (joon. 13.1), tavaliselt sulava jääga täidetud nõusse. Termostaadist väljuvad vaskjuhtmed ühendatakse mõõteriistaga, mille voolu juhtivad



Joon. 13.1. Termopaari lülitus täppismõõtmisteks.

osad on tavaliselt ka vasest, nii pole karta täiendava termoelektromotoorjõu teket. Et vooluringi vaskosa ei mõjusta termoelektromotoorjõu suurust, siis võib kaht termostaadis asuvat jootekohta vaadelda ühe jootekohana, termopaar mõõdab välise jootekoha ja termostaadi temperatuuride vahet. Kahe keha või sama keha kahe punkti temperatuuride vahe mõõtmiseks kasutatakse vahel diferentsiaaltermopaari. Sellel on termopaari traadid kahes kohas kokku joodetud, vasega viiakse kontakti (joodetakse kokku) samast metallist kahe traadi otsad. Täppismõõtmistel on need jootekohad muidugi termostaadis.

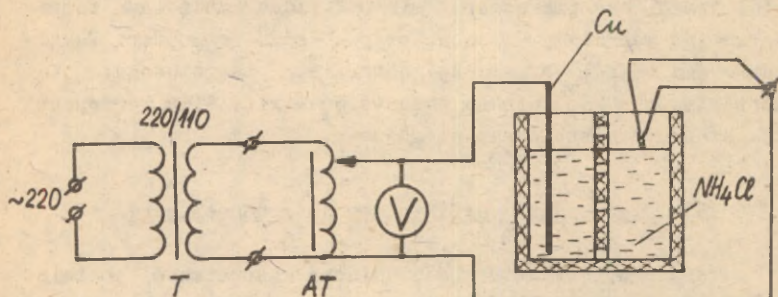
Kui termopinge või -voolu mõõtmiseks kasutatakse milivoltsmeetrit või mikroampermeetrit, siis sõltub mõõteriist näit ka termopaari takistustest. See aga muutub mõõdetava temperatuuri muutudes, sealjuures sõltub muutuse suurus veel traadi osa pikkusest, mis on viidud mõõdetava temperatuuriga keskkonda. Seepärast peab siin termopaari takistus olema väike, võrreldes mõõteriista takistusega. Kui mõõteriistana kasutatakse potentsiomeetrit, siis termopaari takistus mõõtmistulemust ei mõjusta.

13.4. Termopaari valmistamine ja gradueerimine

Termopaari traatide ühendamiseks kasutatakse jootmist ja keevitamist. Jootmisel kasutatakse spetsiaaljootemetal (joodiseid), sõltuvalt termopaari traatide materjalist. Termopaare keevitatakse elektrikaares. Kaar tekitatakse tavaliselt süsielektroodide vahel, keevitatavate pindade oksüdeerumise vältimiseks kasutatakse räbustit (booraks v. m.). Ühe elektroodina võib aga kasutada ka tihedasti teineteise vastu surutud (kokkukeerutatud) termopaari traate endid. Käesolevas töös just nii viisi toimitaksegi, kusjuures teiseks elektroodiks on elektrolüüt - salmiaagi (NH_4Cl) külastatud vesilahus. Selline meetod on hästi lihtne - elektrolüüt on elektrikaarele tingimata vajalikuks eeltakistiks, salmiaak toimib räbustina (katab liidetavad pinnad, kaitseb neid oksüdeerumise eest veel enne sulamist ja kokkuliitumist).

Termopaari valmistamise seadme skeem on toodud joonisel 13.2. Salmiaagilahus on isoleerainest, mulgustatud vaheseinaga anum. Ühel pool vaheseina on lahusesse viidud vaskielektrood, teisel pool vaheseina tekitatakse elektrikaar lahuse pinna ja termopaari traatide vahel. Vaskielektroodi ja termopaari traatide vahele antakse valgustusvooluvõrgust reguleeritav vahelduvpinge üle eraldustrafo T ja reguleeritava autotrafo AT. Traatide keevitatavad osad puhastatakse (vajaduse korral) isolatsioonist, keerutatakse

(pintsettide või näpistangide abil) võimalikult tugevasti ja võimalikult lühidalt kokku, ühendatakse autotrafo väljundklemmiga, pinge reguleeritakse väärtuseni 90 - 100 V.



Joon. 13.2. Termopaari keevitamise seadme skeem.

Kui viia nüüd termopaari kokkukeerutatud traadid ettevaatlikult lahuse pinnaga kokkupuutesse, tekib traatide ja pinna vahel elektrikaar, mis sulatab metallid, keevitades traadid kokku. Kevvitada tuleb-seni, kuni traatide otsa tekib traatidest 2 - 3 korda suurema läbimõõduga metallkerake.

Keevitamisel hoitakse traate käega. Trafo T eraldab skeemi vooluvõrgust, mille üks ots on teatavasti maandatud, nüüd ei satu keevitatavad traadid maa suhtes pinge alla ja töö on ohutu. Kevvitamisel tuleb kasutada kaitseprille, et kaitsta silmi elektrikaarest lähtuva ultraviolettkiirguse eest.

Termopaari termoelektromotoorjõu \mathcal{E} sõltuvust temperatuurist ei saa laias temperatuurivahemikus lugeda lineaarseks. Selle sõltuvuse täpne kuju pole teada, enamiku termopaaride korral lähendab seda küllalt hästi ruutpolünoom

$$\mathcal{E} = at + bt^2. \quad (13.1)$$

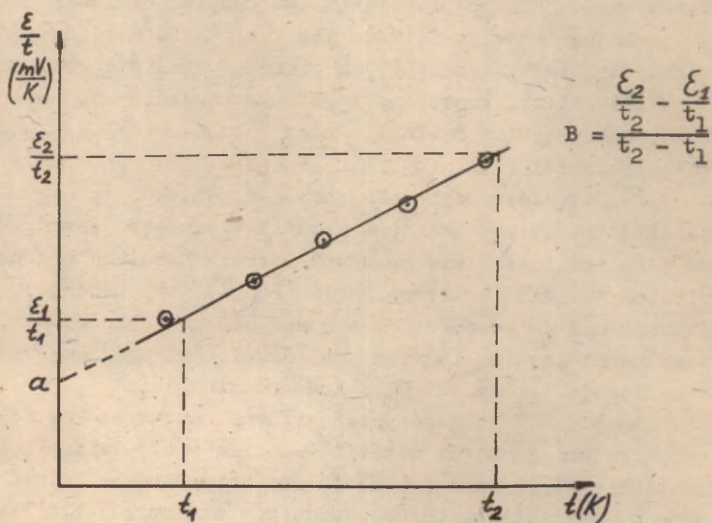
Siin on t jootekohtade temperatuuride vahe, a ja b on katseliselt määratavad konstandid. Kui konstandid on teada, saab valemist (13.1) iga mõõdetud \mathcal{E} väärtuse korral arvutada temperatuuri t , mõõteriista skaala võib ka gradueeri-

da temperatuuri (jootekohtade temperatuuride vahe) ühikut-
tes. Seepärast nimetataksegi konstantide a ja b määramist
termopaari gradueerimiseks.

Konstantide määramiseks on tarvis mõõta \mathcal{E} väärtused
vähemalt kahe tuntud t väärtuse korral ja lahendada kahest
(13.1) tüüpi võrrandist koostatud süsteem konstantide a ja
 b suhtes. Juhuslike mõõtmisvigade mõju vähendamiseks kasu-
tatakse antud töös teistsugust meetodit. Määratakse rohkem
kui kaks (viis) \mathcal{E} ja t väärtuste paari. Kui jagada võrduse
(13.1) mõlemad pooli t -ga, tuleb lineaarne seos suuruste
 $\frac{\mathcal{E}}{t}$ ja t vahel:

$$\frac{\mathcal{E}}{t} = a + bt. \quad (13.2)$$

Konstandid a ja b on selle sõltuvuse graafikul vastavalt
algordinaadi ja tõusu osas. Katsest saadud väärtustepaarid
kantakse graafikule teljestikus t ja $\frac{\mathcal{E}}{t}$, saadud punktid
peaksid asuma ühel sirgel. Kui see juhuslike mõõtmisvigade



Joonis 13.3. Parameetrite a ja b määramine graafikult.

tõttu ei ole nii, tõmmatakse läbi punktide parve sirge, nii et punktide keskmine eemaldumine sirgest piki ε -telge oleks minimaalne. (Praktiliselt tähendab see enamasti, et enam-vähem võrdne arv punkte peab jääma sirgest üles- ja allapoole.) Konstantide a ja b määramist graafikul selgitab joonis 13.3. Temperatuuride väärtused t_1 ja t_2 valitakse mõõdetud temperatuurivahede vahemikus üksteisest võimalikult kaugetena (soovitav ümmargused arvud), vastavad $\frac{\varepsilon_1}{t_1}$ ja $\frac{\varepsilon_2}{t_2}$ leitakse sirge punktide ordinaatidena. (Ei tohi kasutada vahetuid katseandmeid!) Sellist meetodit lineaarfunktsiooni parameetrite määramiseks nimetatakse lineaarregressiooni graafiliseks meetodiks [1, p. 39.2].

13.5. Töö käik

13.5.1. Käesolevas töös valmistame vask-konstantaan-termopaari. Sel juhul piisab ka täppismõõtmistel kahest jootekohast (miks?). Lõikame ühe tüki konstantaan- ja kaks tükki vasktraati (umbes 0,7 m pikad), puhastame vasktraatide otsad lakist, keerutame konstantaantraadi mõlemad otsad kokku vasktraatide otstega, nagu öeldud p. 13.4. Paneme kokku joonisel 13.2 kujutatud skeemi.

13.5.2. Keevitame kokku mõlemad jootekohad, nagu kirjeldatud p. 13.4. Tekkinud metallkerakestest peavad väljuma kaks traati eraldi, vajaduse korral harutame kokkukeevitatud traadid ettevaatlikult lahti, et need jootekoha juurest ära ei murduks, keerutame nad kokku kaugemalt, kus vasktraadi lakkisolatsioon on terve. Sellega on välditud traatide jootekoha lähedalt äramurdumise oht.

13.5.3. Tuntud temperatuuridena kasutame vee keemistemperatuuri ja nelja metalli - tina (Sn), vismuti (Bi), seatina (Pb) ja tsiingi (Zn) sulamistemperatuure. Ained asetame portselantiiglitesse, kuumutame elektriühjus. Tiiglid on märgistatud; iga metalli jaoks tuleb kasutada alati kindlat tiiglit, et vältida metallide segunemist. Et vesi

liiga ruttu ära ei auruks, tuleb vee keetmisel kasutada suuremat tiiglit.

13.5.4. Asetame suure tiigli destilleeritud veega elektriahju. Soojuslikult hästi isoleeritud anumasse valame veidi destilleeritud vett, asetame sinna mõned jäätükid. Segame segu, kogu anuma ruumalas tekib ühtlane temperatuur 0°C . Kinnitame termopaari traadid umbes 10 cm kauguselt ühest jootekohast (sealt, kus me traadid uuesti kokku keerutasime) statiivklambri vahele, laseme jootekoha sulava jää ja vee segusse. Jääanuma asetame võimalikult kaugele ahjust (miks?). Vasktraatide vabad otsad puhastame lakist ja ühendame isekirjutava potentsiomeetri klemmide alla. Kasutame mõõtepiirkonda 0 - 25 mV. Potentsiomeetri käsitlemise kohta loe laual olevast käsitlemisjuhendist. Lülitame potentsiomeetri tööle, soojendame sõrmede vahel termopaari kuumatavat jootekohta. Kui potentsiomeetri sulg liigub nullseisust ära, on termopaar ühendatud õige polaarsusega, vastupidisel juhul vahetame otsad klemmide all. Asetame korra ka teise jootekoha 0°C juurde, laseme potentsiomeetril joonistada nullnäidule vastava sirge (umbes 10 - 20 mm pikkuse) lõigu. Kinnitame traadid ka teise jootekoha lähedalt statiivklambrisse, laseme jootekoha tiiglis olevasse vette.

13.5.5. Lülitame elektriahju valgustusvoolu võrku. Kui vesi hakkab keema, lülitame ahju välja; vesi keeb ahju soojusliku inertsit tõttu veel edasi. Laseme potentsiomeetril joonistada vee keemistemperatuurile vastava sirge lõigu, kirjutame juurde " H_2O ".

13.5.6. Paneme ahju tiigli tinaga, sulatame tina üles, uputame jootekoha sulametalli, lülitame ahju välja ja laseme tiiglit koos ahjuga jahtuda. Potentsiomeeter joonistab nüüd jahtumiskõvera - metalli temperatuuri sõltuvuse ajast jahtumisel. Tahkestumise kestel temperatuur ei muutu, sellele vastab ajateljega paralleelne lõik jahtumiskõveral. Kui temperatuur hakkab uuesti langema (kogu metall on tahkestunud), lülitame ahju uuesti sisse, registreerime ka soojenemiskõvera. Sellel on samuti ajateljega paralleelne lõik.

Võtame jootekoha sulatinast välja, raputame ta kiiresti külgekleepunud metallist puhtaks, enne kui see tahkestuda jõuab.

13.5.7. Kordame eelmises punktis kirjeldatud vismuti, seatina ja tsingiga. Iga metalli jahtumis- ja soojenemiskõverad märgistame isekirjuti paberil, et vältida segiminekut. Paberi kokkuhoiuks lülitame lindiveo mootori sisse vaid vajaliku informatsiooni, s. o. nulli, vee keemistemperatuuri, metallide jahtumis- ja soojenemiskõverate registreerimise ajaks.

13.5.8. Isekirjuti paberi vajaliku informatsiooniga lõikame rulli otsast ära. Pikendame sulamis- ja tahkumistemperatuurile vastavaid sirgeid lõike, nad peaksid kokku langema; kui see pole nii, joonistame nende vahele aritmeetilisele keskmisele vastava sirge. Mõõdame nende keskmiste, samuti vee keemistemperatuurile vastava joone kaugused nulljoonest, arvutame elektromotoorjõu väärtused (diagrammlindi kogulaiusele vastab mõõtepiirkonna haare).

13.5.9. Määrame ruutpolünoomi (13.1) kordajad a ja b, nagu kirjeldatud p. 13.4. Graafiku ehitame millimeetripaberile sobivas mastaabis [1, p. 5.8]. Metallide sulamistemperatuurid leiame p. 13.6 toodud tabelist 13.1, vee keemistemperatuuri õhurõhust sõltuvalt arvutame järgmisest valemist

$$t_{H_2O}/^{\circ}C/ = 100 \left[1 + 3,7 \cdot 10^{-4} (p/mm \text{ Hg}/-760) \right]. \quad (13.3)$$

13.5.10. Valem (13.1) eelnevas punktis määratud konstantidega sobib lähendusvalemina jootekohtade temperatuuride vahe ja termoelektromotoorjõu seose jaoks ainult gradu-eerimisel kasutatud temperatuuride vahemikus, s. o. $0^{\circ}C$ - $420^{\circ}C$. Ekstrapolatsioon kaugele väljapoole seda vahemikku pole lubatud. Ehitame selle vahemiku jaoks termopaari gradu-eerimisgraafiku, arvutanud termoelektromotoorjõu väärtused iga 50 K tagant valemi (13.1) järgi. Graafiku ehitame praktikumi protokolli lehe suurusele millimeetripaberile, punktide ühendamiseks kasutame lekaali. Kanname samas teljestikus joonisele ka kõik katsepunktid koos piirvea ristli-

dega. Piirvea ϵ -telge pidi määrame isekirjutava potentsio-
meetri täpsusklassi järgi, t-telge pidi aga hindame ette-
antud suuruse standardpiirveana (s. o. pool viimase antud
kümnendkoha ühikust). Katsepunktid peavad piirvea piires
langema gradueerimisgraafikule; kui see nii pole, on mõõt-
misel või arvutustes juhtunud jäme viga ja töö tuleb kor-
rata.

13.5.11. Gradueerimisgraafikult peab saama määrata mõõ-
detud termoelektromotoorjõu järgi temperatuuri (temperatuu-
ride vahet) koos piirveaga. Selleks ehitame graafikule piir-
vea koridori. Eeldades, et potentsiomeetri tundlikkus on
õige, võime katsepunktide lubatud vead kogu mõõteseeria sei-
sukohalt lugeda juhuslikeks. Gradueerimisgraafiku mistahes
punkti piirvea piki ϵ -telge määrame (hästi jämedas lähen-
duses) Studenti testi abil [1, p-d 31.3, 31.4, 35.2]. Tule-
muste aritmeetilise keskmise osas on gradueerimisköver.
Mõõdame kõigi katsepunktide kaugused köverast piki ϵ -tel-
ge, need loeme Studenti testi kasutamisel vahedeks ($\epsilon_i - \bar{\epsilon}$).
Arvutame aritmeetrilise keskmise ruutkeskmise hälbe (stan-
dardvea) $S_{\bar{\epsilon}}$, korrutame selle Studenti testi teguriga
 $t_{p,n-1}$ [1, tabel 35.2.2]. Usaldatavus p on üliõpilase enda
valida. Kanne graafiku arvutatud punktidest üles- ja al-
lapoole vertikaalse vealõigu $t_{p,n-1} \cdot S_{\bar{\epsilon}}$, ühendame nende lõi-
kude otsad kummaldi pool gradueerimisgraafikut punktiirjoo-
nega. Punktiirjoonte vaheline ala ongi veakoridor.

13.6. Protokolli vormistamisest

Protokolli algusesse joonestame termopaari valmistami-
se seadme skeemi (joonis 13.2), anname valmistamise protse-
duuri paarilausealise kirjelduse. Sellele järgneb gradueeri-
misprotseduuri kirjeldus. Esitame lähenduspolünoomi ja sel-
le konstantide määramise meetodi lühikirjelduse.

Potentsioometri diagrammlindilt saadud mõõtmistulemu-
sed esitame tabelis vormi 13.1 eeskujul.

T a b e l 13.1

Teise jootekoha temperatuur 0°C .

Mõõtepiirkonna haardele vastav diagrammilindi laius
... mm.

Jrk. nr.	Tuntud temperatuur $t/^{\circ}\text{C}/$	Kaugus nulljoonest diagrammilindil (mm)	Termoelektro- mootorjõud (mV)
1.	H_2O		
2.	Sn 231,9		
3.	Bi 271,0		
4.	Pb 327,3		
5.	Zn 419,4		

Gradueerimisgraafiku ehitamiseks vajalikud arvutustulemused kanname tabelisse vormi 13.2 eeskujul.

T a b e l 13.2

$$a = \dots \frac{\text{mV}}{\text{K}} \quad b = \dots \frac{\text{mV}}{\text{K}^2}$$

Jrk. nr.	$t/^{\circ}\text{C}/$	$\mathcal{E}/\text{mV}/ = at + bt^2$
1.	0	0
2.	50	
3.	100	
.	.	
.	.	
.	.	
.	450	

Edasi esitame kõikide katsepunktide kaugused kõverast millivoltides, nendest arvutatud ruutkeskmise hälbe $s_{\bar{\mathcal{E}}}$ ja Studenti teguri $t_{p,n-1}$ väärtuse valitud usaldatavuse juures. Protokollis lõpus esitame lisaülesannete lahendused (nende ülesannete kohta, mis on antud lahendamiseks pärast praktikumi).

Potentsiomeetri diagrammlindi esitame protokollil vahel.

13.7. Lisaülesandeid

13.7.1. Enne praktikumi:

- A. Miks puudub polünoomis $\mathcal{E} = at + bt^2$ vabaliige?
- B. Miks ei tohi isoleerimata traadid kokku puutuda jootekohast eemal?
- C. Milleks on keevitusnõus vahesein ja miks see on mulgustatud?
- D. Miks millivoltmeetri ja mikroampermeetri kasutamisel sõltub mõõteriista näit termopaari takistusest, potentsiomeetri kasutamisel aga mitte?
- E. Miks ei või soojenemiskõverat registreerida metalli esialgsel ülessulatamisel?

13.7.2. Pärast praktikumi:

- F. Temperatuuri mõõtmisel meie gradueeritud termopaa-
riga näitas potentsiomeeter 12,7 mV. määrata gra-
dueerimisgraafikult jootekohtade temperatuuride va-
he koos piirveaga. arvestades ka potentsiomeetri
lubatud viga.

13.8. Kirjandus

- 1. H. Tammet. Füüsika praktikum. Metroloogia. "Valgus", Tln., 1971.

14. ELEKTRIMÕÕTERIISTADE GRADUEERIMINE JA TAATLEMINE

14.1. Tööülesanne

Tutvumine otsese näiduga (osutiga) elektrimõõteriistade ehitusega, nende gradueerimise ja taatlemise aluste ning tehnikaga. Galvanomeetri gradueerimine voltmeetriks ja ampermeetriks.

14.2. Töövahendid

Gradueeritav galvanomeeter, mitmepiirkonnalsed voltmeeter ja ampermeeter, takistussalv, kaks reostaati, mangaaniintraadist reguleeritava pikkusega šunt, kruvik, alalispinge allikas (alaldi).

14.3. Osutelektrimõõteriistade ehitus

Möödetava suuruse järgi liigitatakse elektrimõõteriistad ampermeetriteks, voltmeetriteks, vattmeetriteks jne. Ampermeetrite, voltmeetrite jne. hulka arvatakse ka mikroampermeetrid, millivoltmeetrid, kilovattmeetrid jne.

Tööpõhimõtte (mõõtemehhanismi ehituse) järgi liigitatakse osutelektrimõõteriistad magnetelektrilisteks, elektromagnetilisteks, elektrodünaamilisteks, elektrostaatilis- teks ja soojusliku süsteemiga mõõteriistadeks. Igat nimetatud mõõtemehhanismi ei saa või ei ole otstarbekas kasutada kõikide elektriliste suuruste mõõteriistades, samuti mitte mistahes vooluliigi (alalis- või vahelduvvoolu) korral. Näiteks kasutatakse elektrostaatilist mõõtemehhanismi ainult pinge mõõtmisel (voltmeetrites); võimsuse mõõtmisel (vattmeetrites) kasutatakse enamasti elektrodünaamilist mõõtemehhanismi. Võimsuse ja energia mõõtmisel kasutatakse veel induktsoonsüsteemiga, sageduse mõõtmisel aga vibratsioon- süsteemiga mõõteriistu.

Mõõtemehhanismide ehituse ja tööpõhimõtte kirjelduse

võib leida ka eestikeelsest kirjandusest. Soovitada võib J. Elgase raamatut [1, lk. 26 - 35, 44 - 48]. Et see raamat on küllalt vana, siis tuleb lisada, et kaasajal puuduvad enamikus tundlikumates mõõteriistades laagrid ja poolteljed; mõõteriista pöörduv süsteem kinnitatakse tugede külge kahe pingutatud metall-lindi abil. Need linnid (tõmmitsad) on pöörlemisteljeks, tekitavad vastupöördemomendi ja juhivad ühtlasi voolu raammähisesse (kui liikuvaks osaks on pöörduv pool). Viidatud raamatus puudub ka põhiliselt kõrgsagedusliku vahelduvvoolu mõõtmisel kasutatava soojusliku süsteemi kirjeldus. Sellise mõõteriista töö põhineb mõõdetava voolu poolt kuumutatava traadi soojuspaisumisel.

Elektrimõõteriistade töö üksikasjalikuma käsitluse võib leida V. Popovi raamatust [3, lk. 48 - 104].

Kõigile mõõteriistadele esitatavad nõuded täpsuse, näitade püsivuse jne. suhtes fikseeritakse riiklike standarditega (GOST-idega). Standardid määravad lubatavate põhi- ja täiendavate vigade suuruse vastavalt mõõteriista täpsusklassile, nõuded mehaanilise vastupidavuse, ülekoormuse talumise ja korpuse isolatsiooni suhtes, markeerimise eeskirjad, katsetuste ja kontrollimeetodid, samuti nõuded mõõteriistadega koos kasutatavate mõõtemanuste (šuntide, eelakistite) kohta ja mõõteriistade numbrilauale kantavad märke.

Lühikokkuvõtte standardites osut mõõteriistadele esitatavatest nõuetest, riistade markeerimisest ja otseste elektrimõõtmiste täpsusest on esitatud H. Tammeti raamatus [2, lk. 122 - 130].

Osutelektrimõõteriista täpsuse määramisel on põhiline taandvea mõiste [2, p. 4.5, 23.2, 23.5]. Tuleb meeles pidada, et taandviga väljendab lubatud viga protsentides skala haardest [2, p. 4.2] ja riistale märgitud täpsusklass tähendab taandpõhiviga, s. o. taandviga normaalsete keskkonnatingimuste korral [2, p. 4.4].

14.4. Mõõteriistade gradueerimine ja taatlemine

Gradueerimise all mõistetakse 1) mõõdu või mõõteriista skaala valmistamist mõõdetava suuruse kindlatele väärtustele vastavaiks vahemikeks jaotamisega; 2) olemasoleva skaala kriipsudele vastavate mõõdetava suuruse väärtuste kindlakstegemist. Sealjuures kasutatakse olemasolevaid mõõtevahendeid. Gradueeritakse uued ehitatavad mõõtevahendid, samuti olemasolevad riistad mõõtepiirkondade laiendamisel või nende kohandamisel neile algselt mittemääratud suuruse mõõtmiseks (näit. temperatuuri mõõtmisel termopaariga võib millivoltmeetri skaala gradueerida kraadides).

Lineaarse skaalaga (jaotise konstantse väärtusega) osutelektrimõõteriistade mõõtepiirkonna muutmisel või nende kohandamisel sellise suuruse mõõtmiseks, mis sõltub lineaarselt suurusest, mille mõõtmiseks antud riist on ette nähtud, taandub gradueerimine skaala lõppnäidu määramisele; skaala teistele kriipsudele vastavad näidud arvutatakse. Muudel juhtudel tuleb määrata skaala igale kriipsule vastav mõõdetava suuruse väärtus (mõõteriista näit) eraldi; tulemused esitatakse tavaliselt tabelina ja vajaduse korral ka graafikuna.

Taatlemine on mõõtevahendi vea määramine ja tema standardile vastavuse (kasutuskõlblikkuse) kindlakstegemine. Mõõtevahendite esmane taatlemine toimub tehases (valmistavas ettevõttes) pärast valmistamist või gradueerimist. Kõik teaduslikuks tööks, tootmisprotsesside kontrollimiseks jne. kasutatavad mõõtevahendid kuuluvad kohustuslikule perioodilisele taatlemisele selleks volitatud eriasutustes: riiklikes ja ametkondlikes mõõtude ja mõõteriistade järelevalve kontroll-laboratooriumides. Taatlemise sageduse, kõlblikuks tunnistatud riistade markeerimise jne. kohta on lugeda H. Tammeti raamatust [2, p. 4.3]. Mõõtevahendi kasutaja võib seda pärast ümberehitamist, teist liiki suuruse mõõtmiseks kohandamist jne. gradueerida, kuid enne sellise mõõteriista kasutamist tuleb see lasta taadelda vastavas kontroll-laboratooriumis.

TRÜ-s taadeldakse mõõtevahendid ametkondlikus mõõtelaboratooriumis. Riistadele kleebitakse sildid järgmise taatlemise ajaga. Selle tähtaja möödumisel on mõõtevahendi kasutamine keelatud, see tuleb saata järjekordestele taatlemisele. See nõue ei kehti õppelaboratooriumides, sest siin on lubatud mõõtmise imiteerimine.

Taatlemisel kasutatava võrdlusriista (taatelmõõteriista) lubatud põhiviga peab olema vähemalt 5 korda väiksem kui taadeldaval mõõteriistal. Seepärast kasutatakse tavaliselt täpsemate mõõteriistade (alates klassist 0,2) taatlemisel potentsiomeetrilisi seadmeid. Vähem täpseid mõõteriisttu taadeldakse täpsematega võrdlemise teel. On lubatud kasutada ka 2,5 korda väiksema põhiviga võrdlusriistu, kui neile on juurde antud parandite tabelid kõigi skaalakriipsude jaoks.

Osutmõõteriistade taatlemisel leitakse taadeldava riista skaala igale kriipsule vastavad mõõdetava suuruse väärtused kahel korral - osuti lähendamisel vaadeldavale kriipsule altpoolt ja ülaltpoolt. Mõlemal juhul arvutatakse viga - taadeldava riista näidu x ja mõõdetava suuruse tõelise väärtuse X vahe. Tõeliseks väärtuseks X loetakse võrdlusriista näit; võrdlusriista viga jäetakse arvestamata (miks?). Kumbki neist vigadest skaala ühegi kriipsu korral ei tohi ületada mõõteriista lubatud põhiviga. Peale selle ei tohi variatsioon (võrdlusriista kahe eelnimetatud näidu vahe) taadeldava mõõteriista skaala ühegi kriipsu korral ületada lubatud väärtust [2, p. 4.6, 23.4]. Sel juhul loetakse mõõteriist korras olevaks ja vastavasse täpsusklassi kuuluvaks. Vastasel korral arvatakse riist järgmisesse (halvemasse) täpsusklassi. Kui taadeldava mõõteriista skaala kriipsudele on tarvis leida parandid, arvutatakse iga kriipsu korral võrdlusriista kahe näidu keskmine X' ja leitakse parandid

$$P(x') = X' - x.$$

Kõik need mõõtmistulemused ja arvutatud vead ning parandid esitatakse ühises tabelis. Taadeldud mõõteriista kasutamisel liidetakse parand riista näidule.

Tundlike gradueerimata skaalaga osutmõõteriistade - galvanomeetrite täpsust ei reglementeerita. Galvanomeetritele antakse dokumentatsioonis tavaliselt kaasa vaid voolu- ja pingekonstandid, s. o. voolutugevus (või pinge), mis tekitab osuti või valgusindeksi ühe jaotise suuruse hälbe. Need suurused antakse ligikaudu, galvanomeeter tuleb vajaduse korral gradueerida tema kasutajal.

14.5. Tundliku mõõteriista gradueerimine ampermeetriks ja voltmeetriks

Etteantud mõõtepiirkonnaga ampermeetri või voltmeetri võib valmistada galvanomeetrist või tundlikumast (etteantust väiksema skaalapiirkonnaga) amper- või voltmeetrist. Nimetame edaspidi sellist laiendamisele kuuluva mõõtepiirkonnaga mõõteriista lihtsalt galvanomeetriks. Ampermeetri saamiseks on tarvis galvanomeetriga paralleelselt lülitada šunt, voltmeetri saamiseks aga tuleb järjestikku lülitada eeltakisti. Šundi ja eeltakisti takistused arvutatakse eelnevalt.

Olgu maksimaalne mõõdetav voolutugevus I_0 , galvanomeetrile lubatav maksimaalne voolutugevus (s. o. vool, mille mõjul galvanomeetri osuti hälbib äärmise jaotiseni) I_g . Lähtudes Kirchhoffi seadusest voolu hargnemise kohta, saame šundi takistuseks

$$R_g = \frac{1}{n-1} R_g, \quad (14.1)$$

kus $n = \frac{I_0}{I_g}$ on šundi kordaja,

R_g - galvanomeetri sisetakistus.

Analoogiliselt saame valemi ka eeltakisti takistuse jaoks:

$$R_e = (n-1) R_g, \quad (14.2)$$

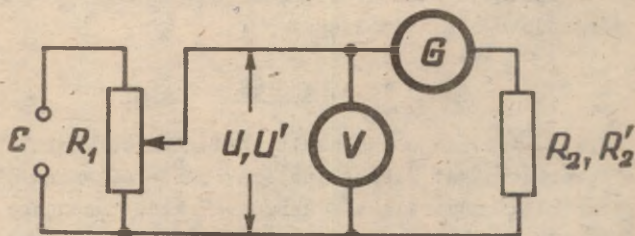
kus $n = \frac{U_0}{U_g}$ on eeltakisti kordaja,

U_0 - maksimaalne mõõdetav pinge,

$U_g = I_g R_g$ - galvanomeetrile lubatav maksimaalne pinge.

Seega šundi ja eeltakisti arvutamiseks tuleb määrata vähemalt kaks suurustest I_g , U_g ja R_g . Väga tundlike galvanomeetrite korral ei saa ühtki neist mõõta otseselt küllalt tundlike võrdlusriistade puudumise tõttu. Takistuse mõõtmise tavalised meetodid (oommeeter, sild) ka ei sobi, sest nende kasutamisel läbib mõõdetavat takistit küllalt tugev vool. Seepärast kasutatakse kaudseid meetodeid.

Lihtsaim meetod I_g ja R_g määramiseks on järgmine. Galvanomeetriga järjestikku lülitatakse täppistakisti R_2 (joonis 14.1). See valitakse nii suur, et galvanomeetrist ja



Joon. 14.1. Skeem galvanomeetri omavoolu I_g mõõtmiseks.

takistist R_2 voolu I_g läbijuhtimisel (galvanomeetri osuti on skaala äärmise kriipsu kohal) on nendel tekkivate pingelangude summa U voltmeetriga mõõdetav. Suurendades R_2 väärtuseni R_2' ja samal ajal suurendades ka pinget, saab voolutugevuse reguleerida uuesti võrdseks I_g -ga, sealjuures pingelangude summa on U' . Saadakse võrrandsüsteem:

$$\begin{cases} \frac{U}{I_g} = R_2 + R_g, \\ \frac{U'}{I_g} = R_2' + R_g. \end{cases} \quad (14.3)$$

Siit on lihtne leida I_g ja R_g .

Pingete U ja U' (ning vastavate R_2 ja R_2') võimalikke väärtusi on lõpmata palju. Konkreetsete väärtuste valik on tüüpiline katse planeerimise ülesanne, mis tuleb lahendada

määratavate suuruste piirvea miinimumi nõudest lähtudes. Sum-
ruse I_g suhtelise piirvea valemil on lihtne välja kirjutada
ja analüüsida. See analüüs näitab, et kui on kasutada mit-
mepiirkonnaline voltmeeter ja küllalt suure väljundpingega
pingeallikas, saab volutugevust I_g eelkirjeldatud meeto-
dil määrata suhtelise piirveaga, mis võrdub voltmeetri ja
täppistakisti täpsusklasside summaga. Sisetakistuse R_g piir-
vea valem on keerukas; tema lähem analüüs näitab, et R_g
määramise täpsus võrrandsüsteemist (14.3) tuleb väike. See-
pärast on soovitatav mõõta pinge U_g otseselt, kui on kasu-
tada vastav millivoltmeeter. Selleks on tarvis esimesel
joonisel kujutatud skeemis reguleerida $R_2 = 0$ ja pingeal-
lika väljundpinge minimaalseks.

14.6. Töö käik

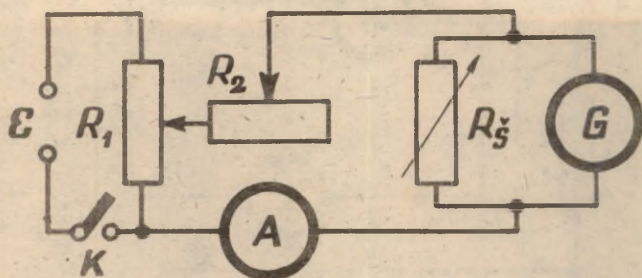
14.6.1. Tutvume põhjalikult kõigi töös kasutatavate
osutmõõteriistadega. Teeme kindlaks mõõtemehhanismi liigi,
selgitame kõigi numbrilauale kantud märkide tähenduse.

14.6.2. Koostame esimesel joonisel toodud skeemi. Täp-
pistakistina kasutame takistussalve, pinge mõõtmiseks mit-
mepiirkonnalist voltmeetrit. Mõõdame p. 5 kirjeldatud meeto-
dil pinged U ja U' ning takistused R_2 ja R'_2 . Pingete väär-
tused ja voltmeetri vastavad mõõtepiirkonnad valime lisa-
ülesande A lahenduse alusel. Arvutame I_g koos piirveaga.

14.6.3. Reguleerime pingeallika pinge minimaalseks, ta-
kistussalve takistuse nulliks. Kasutades voltmeetri 1- või
3-voldilist mõõtepiirkonda, määrame jämedalt galvanomeetri
täishälbe pingelangu U_g (s. o. pinge galvanomeetri klemmi-
del, mille korral galvanomeetrit läbib vool I_g). Valime so-
biva piirkonnaga millivoltmeetri, asetame ta skeemi volt-
meetri asemele, mõõdame U_g , määrame tema piirvea. Arvutame
galvanomeetri sisetakistuse R_g koos piirveaga.

14.6.4. Arvutame šundi või eeltakisti takistuse vasta-
valt juhendaja poolt antud mõõdetava voolu või pinge mak-
simaalväärtusele (graduateeritava amper- või voltmeetri mõõ-
tepiirkonnale) koos piirveaga.

14.6.5. Kui ülesandeks on galvanomeetri gradueerimine ampermeetriks, koostame skeemi vastavalt joonisele 14.2.



Joon. 14.2. Skeem ampermeetri gradueerimiseks.

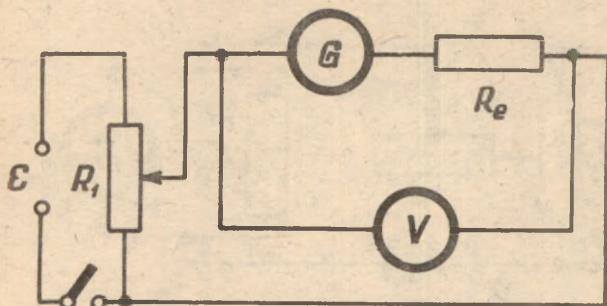
R_1 ja R_2 - reostaadid, R_g - manganintraadist šunt, A - võrdlusampermeeter, G - gradueeritav galvanomeeter, K - lüliti, \mathcal{E} - pingallikas.

Šundina kasutame alusele kinnitatud pingutatud manganintraati. Traadi läbimõõdu mõõdame kruvikuga, arvutame traadi vajaliku pikkuse (eritakistuse väärtus on antud šundi alusel). Seame šundi pikkuse võrdseks arvutatuga, kasutades libisevat kontakti ja alusele kinnitatud mõõdulinti. Pingestame skeemi (juhendaja on selle kontrollinud!), vajaduse korral reguleerime šundi pikkust katseliselt, kuni mõõtepiirkonna lõppnäit vastab etteantule.

Šundi pikkuse sobitamine nõuab erilist ettevaatust, sest kas või hetkeline katkestus šundi ahelas tähendab galvanomeetri mähise läbipõlemist. (Miks?) Seepärast on ümberlülitatavate mõõtepiirkondadega ampermeetritel spetsiaalse ehitusega ümberlülitjad, mis kindlustavad pideva kontakti. Ka antud töös tuleb kasutada erilisi ettevaatusabinõusid. Igasuguste ümberlülituste tegemisel, eriti aga šundi pikkuse reguleerimisel, peab lüliti K olema avatud!

14.6. Kui ülesandeks on galvanomeetri gradueerimine

voltmeetriks, koostame skeemi vastavalt joonisele 14.3. Valime eeltakistina kasutatavast takistussalvest arvutatud



Joon. 14.3. Skeem voltmeetri gradueerimiseks.

R_1 - reostaat, R_e - takistussalv, V - võrdlusvoltmeeter, G - galvanomeeter, \mathcal{E} - pingallikas.

takistuse väärtuse, pingestame skeemi; vajaduse korral reguleerime R_e väärtust, kuni mõõtepiirkonna lõppnäit vastab etteantule.

14.6.7. Taatleme niiviisi gradueeritud amper- või voltmeetri vastavalt p. 14.4 toodud eeskirjadele. Ajakulu vähendamiseks piirdume ainult suurte skaalakriipsudega (millele on arvud juurde kirjutatud). Taatelriista näitude registreerimist alustame taadeldava galvanomeetri maksimaallugemist (sest šundi või eeltakisti reguleerimisel jäi see lugem peale), vähendades voolutugevust (pinget) järk-järgult nullini ja liikudes siis tagasi. Et tegemist on keskmise nulliga galvanomeetriga, siis muudame voolu suunda läbi selle ja teeme kõike sedasama ka skaala teise poole korral. Sealjuures ei tohi enam muuta šunti ega eeltakistust. Kandnud tulemused tabelisse (tabeli vorm vt. p. 14.7), arvutame vea ja variatsiooni skaala kõigis punktides. Leiame suurima vea; kui taatelriist ei vasta esitatavatele nõuetele (vt. p. 14.4), liidame suurimale veale taatelriista lubatud vea.

Võrdleme summat taadeldava riistaga ("galvanomeetri") täpsusklassi järgi arvutatud lubatud veaga. Kontrollime, kas variatsioon ei ületa lubatud väärtust. Teades, et taatlemisel ei saa mõõteriista arvata paremasse täpsusklassi, kuigi kontrollimise tulemuste järgi ta võiks sinna kuuluda, määrame kindlaks gradueeritud mõõteriista täpsusklassi.

14.6.8. Taadeldud mõõteriista taandpõhivea kaudu arvutame lubatud suhtelise põhivea skaala kõikide punktide jaoks, joonestame graafiku suhtelise vea sõltuvuse kohta skaala lugemist. Millise järelduse saab teha sellest graafikust?

14.7. Protokolli vormistamisest

Protokolli algusse kirjutame võrrandisüsteemi (14.3) lahendi ja teised kasutatavad valemid koos sümbolite selgitusega. Edasi peab siin kajastuma mõõtmise planeerimine - lisäülesande A lahendus. Üles tuleb kirjutada juhendaja poolt antud mõõtepiirkonna ulatus, šundi või eeltakisti takistuse arvutatud ja sobitamisel saadud väärtus.

Taatlemise tulemused kanname tabelisse vormi 14.1 järgi. Sümbolite x , X ja X' asemele kirjutame konkreetset juhul kas u , U , U' või i , I , I' .

T a b e l 14.1

Galvanomeetri lugem	Gradueeritava mõõteriista näit x	Võrdlusriista näit		Viga		Variatsioon $X-X'$	Lubatud suhteline põhiviga E_0
		x	x'	$x-X$	$x-X'$		
500							
400							
300							
200							
100							
0							
-100							
-200							
-300							
-400							
-500							

Lubatud suhtelise põhivea graafiku joonestame millimeetripaberile.

Protokolli lõpus peab olema järeldus gradueeritud mõõteriista täpsusklassi kohta.

14.8. Lisaülesandeid

14.8.1. Enne praktikumi:

A. Lahendada süsteem (14.3). Kirjutada välja galvanomeetri täishälbe - voolutugevuse I_g suhtelise piirvea valem. Selgitada, kuidas tuleb valida U , U' , R_2 , R_1 , et suhteline piirviga $\frac{\Delta I}{I_g}$ tuleks ligikaudu võrdne voltmeetri lubatud taandvea ja takistussalve lubatud suhtelise vea summaga.

B. Millal tuleb p. 14.6.7 ja lisaülesandes A kirjeldatud tegevuse korral arvestada ainult lubatud põhivigu, millal aga ka lubatud lisavigu?

C. Mida teha, kui voltmeetri etteantud mõõtepiirkonna jaoks arvutatud eeltakisti takistus osutub suuremaks kui võimaldub valida kasutadaolevast takistussalvest?

D. Milleks on ampermeetri gradueerimise skeemis reostaat R_2 , samal ajal kui voltmeetri gradueerimise skeemis piisab ainult pingejagurist R_1 ?

14.9. Kirjandus

1. J. Elgas. Elektrimõõtmise käsiraamat. ERK, Tln., 1963.
2. H. Tammet. Füüsika praktikum. Metroloogia. "Valgus", Tln., 1971.
3. V.S. Popov. Elektrimõõtmised ja mõõteriistad. "Valgus", Tln., 1966.

15. JUHTIDE TAKISTUSE MÕÕTMINE

15.1. Sissejuhatus

Elektrijuhtide takistuse mõõtmise meetodi valik ole-
neb mõõdetava takistuse väärtusest ja nõutavast täpsusest.
Suhteliselt lihtsalt on saavutatav küllaldane täpsus kesk-
miste takistuste ($1\Omega - 10^6\Omega$) mõõtmisel. Käesolevas
töös tutvustataksegi just selliste takistuste mõõtmise mee-
todeid.

15.2. Takistuse mõõtmine oommeetriga

15.2.1. Tööülesanne

Tutvumine oommeetrite elektriliste skeemidega. Oommeet-
ri lubatud suhtelise vea määramine lubatud taandvea kaudu.
Kahe takisti takistuse mõõtmine ja mõõtmisvea hindamine.

15.2.2. Töövahendid

Oommeeter või tester, takistussalv, mõõdetavad takis-
tid.

15.2.3. Oommeetrite ehitusest ja mõõtmistäpsusest

Oommeetriks nimetatakse osutmõõteriista takistuse mõõt-
miseks.

Lihtsamate oommeetrite põhimõtte skeemid on toodud joo-
nistel 15.1 ja 15.2.

Skeemil 15.1 on mõõdetav takisti r_x lülitatud järjes-
tikku magnetelektrilise mõõteriistaga M ja tuntud takistu-
sega takistiga r_0 . Mõõteriista osuti kõrvalekalle α on
võrdeline ahelat läbiva voolutugevusega I , ja vastupidi

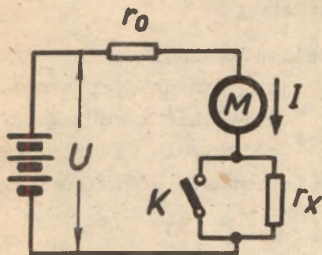
$$I = C\alpha,$$

kus C on mõõteriista konstant.

Ohmi seaduse kohaselt

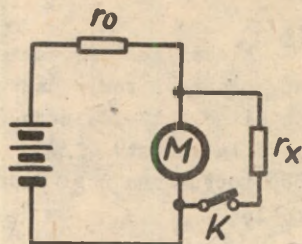
$$I = \frac{U}{r_0 + r_i + r_x}.$$

Siin r_i tähistab mõõteriista takistust.



Joon. 15.1

Järjestiklülitusega oommeetri skeem.



Joon. 15.2

Paralleellülitusega oommeetri skeem.

Kui pinge U ja mõõteriista konstant C mõõtmise protsessis ei muutu, siis riista osuti kõrvalekalle α avaldub r_x ühese funktsioonina

$$\alpha = \frac{I}{C} = \frac{U}{C} \cdot \frac{1}{r_0 + r_i + r_x}.$$

Sellise mõõteriista skaala võib olla gradueeritud vahetult oomides. On selge, et skaala ei ole lineaarne, jaotise väärtus ei ole kogu skaala ulatuses püsiv.

Skeemis 15.2 on mõõdetav takisti r_x lülitatud mõõteriistaga paralleelselt. Nüüd on riista läbiv vool arvutatav valemist

$$I = C \alpha = \frac{U}{r_0 + \frac{r_x r_i}{r_x + r_i}} \cdot \frac{r_x}{r_x + r_i},$$

millest

$$\alpha = \frac{U}{C} \cdot \frac{1}{r_0 + r_i + r_0 \cdot \frac{r_i}{r_x}}.$$

Nagu näha viimasest valemist, avaldub mõõteriista osu-

ti hälve on ka seekord konstantsete U ja C väärtuste juures r_x ühese funktsioonina. Skaala pole ka siin lineaarne.

Skeemi 15.1 kasutatakse tavaliselt oommeetrites, mis on ette nähtud suurte takistuste mõõtmiseks ($r_x \gg r_0$ ja $r_x \gg r_1$). Skeemi 15.2 kasutatakse oommeetrites, mis on ette nähtud väikeste takistuste (võrreldavad r_1 -ga) mõõtmiseks.

Oommeetreid toidetakse tavaliselt akudest või kuiv-elementidest, mille pinge pole rangelt konstantne. Seetõttu on oommeetris seadmed, mis võimaldavad teda reguleerida nii, et pinge U väärtuste korral, mis vähe erinevad normaalsest, oommeeter näitaks mõõdetava takistuse õiget väärtust. Reguleerimine toimub mõõteriista konstandi C muutmise teel, mida võib teha mitmel viisil. Levinud on oommeetrid, mille magnetelektriline mõõteriist on varustatud magnetilise šundi-ga. Šundi käepide on toodud välja paneelile. Pöörates käepidet, muudetakse šundi asendit mõõteriista magneti pooluste suhtes ja seega järelikult ka tema konstanti. Järjestik-lülitusega (joon. 15.1) oommeetri reguleerimisel suletakse lüliti K ($r_x = 0$) ja pöörates magnetilise šundi käepidet asetatakse riista osuti skaala jaotisele, mis vastab $r_x = 0$. Vool läbi mõõteriista on maksimaalne

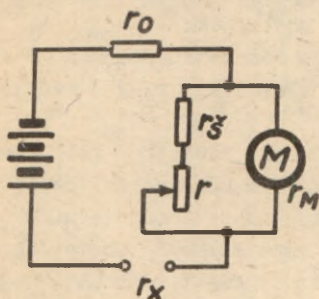
$$I_0 = C \alpha_0 = \frac{U}{r_0 + r_1}.$$

Paralleel-lülitusega oommeetrit reguleeritakse lüliti K avatud asendis. Sellele vastab $r_x = \infty$. Seejuures läbib riista maksimaalne vool

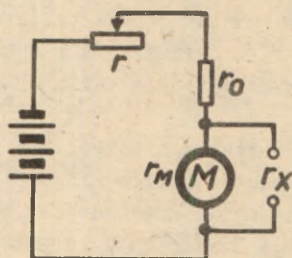
$$I_0 = C \alpha_0 = \frac{U}{r_0 + r_1}.$$

Universaalsetes mõõteriistades - amper-volt-oommeetrites (testrites) kasutatakse ühte mitme skaalaga mõõteriista nii voolutugevuse, pinge kui ka takistuse mõõtmiseks. Mõõtemehhanismi tundlikkus peab olema seejuures konstantne. Oommeetrit reguleeritakse muudetava takistusega takisti abil, mis on ühendatud paralleelselt mõõteriistaga järjestik-lülitusega oommeetrites (joon. 15.3) või järjestikku sellega - paralleellülitusega oommeetrites (joonis 15.4).

Täiuslikumad on oommeetrid, milles mõõteriistaks on magnetelektriline logomeeter [2, lk. 28]. Logomeeter mõõdab kahe voolutugevuse suhet ja seepärast tema näidud ei muutu,



Joon. 15.3. Elektriliselt reguleeritav järjestikülitusega oommeeter.



Joon. 15.4. Elektriliselt reguleeritav paralleellütusega oommeeter.

kui toitepinge teatud vahemikus muutub. Logomeetrilised oommeetrid ei vaja eelnevat reguleerimist.

Tööstuslike oommeetrite täpsusklassid (K) on 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 ja 4,0.

Mõõteriista valmistamise ebatäpsuse ja tema mehaaniliste ja magnetiliste omaduste võimaliku muutumise tõttu erinevad riista näidud alati mõõdetava suuruse tõelisest väärtusest. Mõõteriista skaala igas punktis võib see erinevus - mõõteriista viga - erinev olla, selle vea täpne väärtus on alati teadmata. Standardiga kehtestatakse selle vea ülemine piir - lubatud viga (lubatud põhiviga ja liisavead, vt. [1, p. 4.5; 23.1 - 23.12]). Osutelektrimõõteriistade korral tähendab see, piltlikult öeldes, et osuti võib mõõdetava suuruse tõelist väärtust tähistavast punktist skaalal teatud kaarelõigu võrra kõrval peatuda - lubatud veale vastab skaalakaare kindla pikkusega lõik. Lineaarse skaala korral vastab sellele lõigule ka mõõdetava suuruse väärtuste konstantne vahemik - lubatud viga on kogu skaala ulatuses sama. Sellise mõõteriista taandviga [1, p. 4.5] väljendab lubatud viga protsentides skaala haardest [1,

p. 4.2]. Taandpõhiviga ongi täpsusklass K. Ebalineaarse skaalaga mõõteriistadel vastab aga ülelnimetatud kaarelõigule igas skaalapunktis mõõdetava suuruse väärtuste erinev vahemik - lubatud viga muutub skaala piirides. Täpsusklass K näitab siin, mitu protsenti moodustab see kaarelõik skaala geomeetrilisest pikkusest. Lubatud põhiviga tuleb nüüd leida skaala igas punktis kui näitade vane, mis vastab K protsendile skaala kaare pikkusest. Ka lubatud lisavea reglementeeritakse protsentidena skaala geomeetrilisest pikkusest.

Kui lineaarset skaalaga osutmõõteriista korral mõõtmistäpsust iseloomustab lubatud suhteline viga võrdub skaala lõppnäidu korral täpsusklassiga (aga kuidas on lugu, kui skaala algnäit ei võrdu nulliga?) ja kasvab piiramatult skaala nulli suunas, siis ebalineaarse skaala korral võib lubatud suhteline viga kogu skaala ulatuses olla oluliselt suurem täpsusklassist (arvust K), selle vea sõltuvust mõõteriista lugemist tuleb eraldi uurida. Mitmepiirkonnalise oommeetri korral on selline uurimine tarvilik, et selgitada välja minimaalse lubatud suhtelise veaga skaalalõik. Sama takistust on siin tavaliselt võimalik mõõta mitmes skaalapiirkonnas, valida tuleb see piirkond, milles mõõdetavale takistile vastav näit asub minimaalse suhtelise veaga skaalalõigul.

15.2.4. Töö käik

15.2.4.1. Testri numbrilauale on kantud mitu täpsusklassi tähistavat arvu. Teeme kindlaks, milline neist kuulub oommeetri (takistuse) skaalale [1, p. 23.2].

15.2.4.2. Määrame testri oommeetri suhtelise vea sõltuvuse mõõteriista lugemist. Selleks tuleb kõigepealt leida K protsenti skaalakaare pikkusest. Mõõdame voolutugevuse ja pinget mõõtmiseks ettenähtud lineaarskaala ühikutes oommeetri skaala pikkuse, arvutame sellest K protsenti. Valime mõõtepiirkonna vastavalt lisäüllesande B lahendusele. Lülitame oommeetri klemmidele takistussalve, reguleerime

salve takistust, kuni osuti asub mingi skaalakriipsu kohal (täisarvuline lugem α). Takistussalve või oommeetri enda nulliregulaatorit kasutades nihutame osutit lineaarskaala järgi lubatud põhiveale vastava lõigu võrra paremale ja vasakule, registreerime oommeetri näidud - usalduspiirid α^+ ja α^- . Arvutame polaarsed lubatud põhivead $\alpha^+ = \alpha^+ - \alpha$ ja $\alpha^- = \alpha^- - \alpha$. Arvutame vastavad lubatud suhtelised põhivead. Selliselt toimime 6 - 8 täisarvulise lugemi korral, need lugemid olgu paigutatud skaalal enam-vähem ühtlaselt (näit. 3, 8, 13, 20, 35, 60, 100). Joonestame positiivse ja negatiivse suhtelise polaarse põhivea graafikud.

15.2.4.3. Valime vabalt oommeetri mõõtepiirkonna, lühistame sisendi, reguleerime osuti nullile. Mõõdame orienteerivalt mõlema antud takisti takistused. Nüüd valime kummagi takisti jaoks optimaalse mõõtepiirkonna, kordame mõõtmist. (Pärast mõõtepiirkonna vahetust tuleb alati uuesti reguleerida nulli!) Määrame polaarsed piirvead. Kui mõõtmine toimub normaaltingimustes [1, p. 4.4, 23.3, 23.7], võib piirvead määrata suhtelise polaarse põhivea graafikult. Kui aga on tarvis arvestada ka lisavigu, tuleb toimida nagu p. 15.2.4.2.

15.2.5. Lisaülesandeid

15.2.5.1. Enne praktikumi:

A. Enamasti on osutmõõteriista mehaaniline null (s. o. osuti asend, kui riista ei läbi vool) skaala vasakpoolses otsas. Teha kindlaks, kummas otsas on oommeetri skaala null joonistel 15.3 ja 15.4 kujutatud lülitusskeemide korral.

B. Testril on mitu takistuse mõõtepiirkonda, mida saab vahetada ümberlüliti abil. Lubatud suhtelise põhivea sõltuvuse uurimisel oommeetri lugemist (mitte näidust!) on mõõtepiirkonna valik põhimõtteliselt vaba. Milline mõõtepiirkond on kasulik valida toiteallika (kuivelementide) kokkuhoiduks, kas maksimaalse või minimaalse ülemise mõõtepiiriga? Testri oommeeter on ehitatud joonisel 15.3 kujutatud skeemi järgi, mõõtepiirkondi vahetatakse takistite r_0 ja r_g samaaegse muutmisega.

15.3. Takistuse mõõtmine alalisvoolu sillaga

15.3.1. Tööülesanne

Tutvumine alalisvoolu sildskeemidega. Kahe takisti takistuste mõõtmine omakoostatud ja tööstusliku alalisvoolu sillaga. Järjestikku ja paralleelselt ühendatud takistite kogutakistuse valemite kontrollimine.

15.3.2. Töövahendid

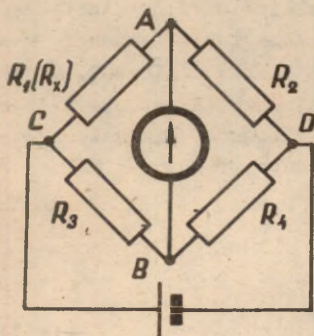
Reohord, takistussalv, nullgalvanomeeter, vooluallikas (akupatarei), surunupp-lüliti, ümberlüliti, tööstuslik sild, ühendjuhtmed, kaks mõõdetavat takistit.

15.3.3. Alalisvoolu sildskeemide tööpõhimõte

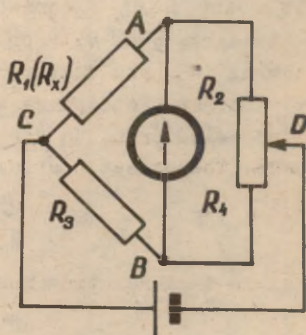
Takistuse mõõtmisel võrreldakse mõõdetava takisti takistust mõõttakisti või takistussalvest valitud takistite takistusega. Et mõõtmise lubatud vead on väikesed, saavutatakse sealjuures suur täpsus.

Keskmise suurusega takistuste mõõtmisel kasutatakse lihtsat sildskeemi (Wheatstone'i silda) (joon. 15.5).

Silla elementide (õlgade) takistuste vastava valikuga on võimalik saavutada olukorda, kus voolutugevus läbi gal-



Joon. 15.5
Wheatstone'i silla skeem.



Joon. 15.6
Lineaarne sild.

vanomeetri $I_g = 0$. Sellist olukorda nimetatakse silla tasakaaluolukorraks. Sel juhul on punktide A ja B potentsiaalid võrdsed ja võib kirjutada

$$I_1 R_1 = I_3 R_3,$$

$$I_2 R_2 = I_4 R_4.$$

Kui $I_g = 0$, siis ilmselt $I_1 = I_2$ ja $I_3 = I_4$ ning silla tasakaalutingimus on

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

või

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}. \quad (15.1)$$

Olgu R_1 tundmatu takistus: $R_1 \equiv R_x$. Silda võib põhimõtteliselt tasakaalustada ükskõik millise takistuse muutmiseega ülejäänud kolmest. Tavaliselt valitakse muudetavaks kas R_3 (võrdlusõlg) või suhe R_2/R_4 (suhteõlad); laia mõtetiirkonnaga sildade korral muudetakse mõlemat. Võrdlusõlaks võib olla aga ka R_2 ja suhteõlgadeks R_3 ning R_4 . Töösutuslikes sildades on R_3 muudetav tavaliselt kas väga väikeste astmete ($0,1\Omega$, $0,01\Omega$) kaupa või pidevalt, R_2/R_4 aga 10 , 10^2 , 10^3 , ..., 10^n korda.

Lihtsamates ja vähemtäpsetes sildades muudetakse pidevalt suhet R_2/R_4 (joonis 15.6). Selliseid sildu nimetatakse lineaarseteks. Siin on R_2 ja R_4 sama takistustraadi — reohordi — kaks osa; punktis D on liikuv (libisev, vee-rev) kontakt. Reohordiga silla puhul saab takistuste R_2 ja R_4 mõõtmise asendada vastavate traadiosade pikkuste mõõtmisega. Tõepoolest, ühtlase läbimõõduga traadi korral

$$\frac{R_2}{R_4} = \frac{l_2}{l_4}.$$

ja silla tasakaalutingimus saab kuju

$$R_x = R_3 \frac{l_2}{l_4}. \quad (15.2)$$

Sildskeemide üheks tähtsaimaks parameetrik on tundlikkus. Kui silla tasakaaluolukorras muuta veidi reguleeritavat õlga - näiteks R_3 suuruse δR_3 võrra, tekib galvanomeetri ahelas nõrk vool δI_g . Suhet

$$S = \frac{\delta I_g}{\delta R_3}$$

nimetatakse sildskeemi voolutundlikkuseks. Silla tundlikkus ja galvanomeetri tundlikkus (ühikulisele voolutugevusele vastav osuti hälve) peavad olema nii sobitatud, et reguleeritava takisti takistuse muutmine tema lubatud veast 10 korda väiksema astme võrra tekitaks sellise δI_g , mis annab galvanomeetri osuti veel märgatava hälbe. Et töötamine tundlike galvanomeetritega on tülikas, siis on kasulik valida silla õlad nii, et skeemi tundlikkus oleks võimalikult suur. Saab näidata, et tundlikkus suureneb, kui tarbida toiteallikast suuremat võimsust (näiteks valida õlad 3 ja 4 väikese takistusega). Konstantse tarbitava võimsuse korral on tundlikkus suurem sümmeetrilise silla kasutamisel, s. o. kui $R_3 \approx R_4$ (ja muidugi ka $R_1 \approx R_2$).

Silla konstruktsiooni õige valikuga on üldjuhul võimalik saavutada seda, et R_x suhteline viga on määratud ainult mõõttakistite R_2, R_3, R_4 suhteliste vigade summaga (vt. valemeid (15.1) ja (15.2)). Selleks on tarvis vastavalt eelöeldule õigesti sobitada silla ja galvanomeetri tundlikkused, siis võib tasakaalustamise viga ignoreerida. Viimane tekib sellest, et silda pole võimalik ideaalselt tasakaalustada galvanomeetri lõpliku tundlikkuse tõttu. Võrdlusõla takistust (või suhteõlgade takistuste suhet) on alati võimalik teatud väikeses ulatuses muuta, ilma et sellega kaasaeks galvanomeetri osuti märgatav nihe. Pool reguleeritava elemendi takistuse muutusest, mis viib silla tasakaalust märgatavalt välja, loetakse tasakaalustamise veaks, ta liidetakse (vajaduse korral) selle elemendi lubatud veale. Reohordiga silla puhul lisandub täiendavaid veaallikaid. Kõigepealt võib liikuv kontakt traati ebaühtlaselt kulutada. Järelikult $1_2/1_4 \neq R_2/R_4$. Tekkinud meetodilise vea kõrval-

damiseks mõõdetakse R_x kahel korral, vahetades vahepeal õlad R_2 ja R_4 (reohordi otsad lülitatakse skeemis ümber), kahe tulemuse keskmine on sellest veast vaba. Omakoostatud sildade puhul ühendatakse silla kõik elemendid omavahel kaablikingade või pistikutega varustatud juhtmetega. Suure hulga jootmata kontaktide korral, kui lisaks sellele ka riistad on küllalt hajali laual ja on tõenäoline, et temperatuur skeemi erinevates punktides pole sama, võivad silla õlgades tekkida termoelektromotoorjõud. Sel juhul tasakaalutingimus (15.1) ei kehti täpselt ja R_x määramisel tekib meetodiline viga. Sellest veast on vaba kahe mõõtmistulemuse keskmine, mis on saadud voolu erinevate suundade korral skeemis (vahetatakse toiteallika otsad). Suured ja muutlikud termoelektromotoorjõud võivad tekkida liikuva kontakti määrdunud pindadel. Seepärast püütakse skeem koostada nii, et liikuv kontakt ei jääks galvanomeetri ahelasse (punktide A ja B vahele).

Eelõeldu põhjal võib öelda, et joonisel 15.6 kujutatud lineaarse silla skeem on kasulik termoelektromotoorjõudude segava mõju vältimiseks, samuti kindlustab toitepinge allika minimaalse koormamise (reohordi takistus on tavaliselt väike, suurusjärgus 10Ω). Tundlikkuse seisukohast on eelistatud aga joonisel 15.7 kujutatud skeem.

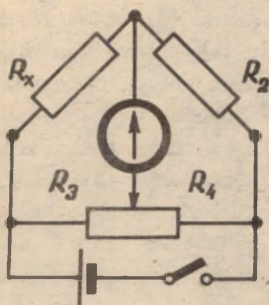
Wheatstone'i sild ei sobi väga väikeste takistuste ($R_x < 1 + 10\Omega$) mõõtmiseks. Sel juhul kasutatakse Thomsoni (kahekordset) silda [3, lk. 105 - 115].

15.3.4. Töö käik

15.3.4.1. Et kasutatavate galvanomeetrite tundlikkus on väike, siis termopinged oluliselt mõõtmistulemust ei mõjusta, mistõttu valime suurema tundlikkusega skeemi (joonisel 15.8).

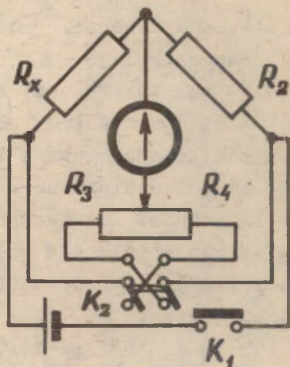
Eelõeldu põhjal pole voolu suuna vahetamine vajalik; reohordi õlgade vahetamiseks on skeemis ümberlülititi K_2 .

Võrdlusõlaks R_2 on takistussalv, suhteõlad R_3 ja R_4 on reohordi osad; K_1 on surunupplülititi.



Joon. 15.7

Suure tundlikkusega lineaarne sild.



Joon. 15.8

Lineaarne sild suhteõlgade ümberlülitiga.

Koostame skeemi. Kontaktide takistuse vähendamiseks keerame kõik klemmid hästi tugevasti kinni.

15.3.4.2. Uuritavate takistite takistus on käesoleva töö esimeses osas oommeetriga (väikese täpsusega) mõõdetud. Kui salvest on võimalik valida takistust nii, et $R_2 \approx R_x$, siis kasutame sümmeetrilist silda. Seame reohordi õlad võrdseks, valime $R_2 \approx R_x$ ja tasakaalustame silla R_2 reguleerimisega. Et vältida galvanomeetri kahjustumist, toiteallika ülekoormamist ja kontaktide soojenemist reohordi läbiiva suure voolu toimel, lülitame voolu lülitiga K_1 ahelasse pärast iga reguleerimisoperatsiooni vaid hetkeks. Silla tasakaalustamisel ei vii sihile nn. "katse-eksituse" -meetod - takistussalve dekaadlülitite juhuslik pööramine lootuses tabada õige asend. Reguleerimist tuleb alustada suurema takistusega dekaadidest, minnes järk-järgult väiksemate astmete poole. Kui salve takistuse minimaalse võimaliku muut-

mise korral galvanomeetri osuti nihkub märgatavalt, tuleb tasakaalustamist täpsustada reohordi õlgade suhte l_3/l_4 muutmisega. Hindame tasakaalustamise viga vastavalt p. 15.3.3 antud juhisteile.

15.3.4.3. Mõõdame mõlema takisti takistused kaks korda, lülitanud vahepeal ümber reohordi õlad, arvutame keskmised. Sümmetrilise silla korral on aritmeetiline keskmine kahest mõõtmistulemusest, millest kummagi korral on ainult reohordi õlad vahetatud, esimeses lähenduses vaba veast, mis on põhjustatud suhete l_3/l_4 ja R_3/R_4 väikesest ebavõrdsusest (vt. lisaülesande B lahendust). Seepärast võime esimeses lähenduses ignoreerida ka reohordi õlgade pikkuse mõõtmisviga ja tulemuse piirvea loeme määratuks ainult takistussalve ja tasakaalustamise vigadega (kui viimast ei või ignoreerida).

15.3.4.4. Mõõdame mõlema takisti takistused tööstusliku alalisvoolu sillaga, tutvunud eelnevalt silla kasutamishuendiga. Võrdleme kolmel meetodil saadud mõõtmistulemusi; need peavad piirvigade piires kokku langema.

15.3.4.5. Mõõdame tööstusliku sillaga meie kahe takisti järjestik- ja paralleelühenduse takistused, määrame piirvead. Arvutame järjestik- ja paralleelühenduse takistused p. 15.3.4.4 järgi saadud mõõtmistulemuste järgi, arvutame piirvead. Tulemuste kokkulangevus piirvigade piires on kogutakistuse valemite õigsuse katseline tõestus.

15.3.5. Lisaülesandeid

15.3.5.1. Enne praktikumi:

A. Joonestada joonistel 15.6 ja 15.7 kujutatud skeemid ümber, lisades sinna ka elektromotoorjõu allika liikuva kontakti kohal. Miks skeemis joon. 15.6 elektrimotoorjõud ei mõjusta silla tasakaaluolukorda, aga skeemis joon. 15.6 mõjustab?

B. Tõestada, et sümmetrilise silla korral võib reohordi traadi ebaühtlusest tingitud vea arvestamata jätta, kui mõõtmistulemuseks lugeda aritmeetiline keskmine kahe

mõõtmise tulemustest, millest kummagi korral on ainult reo-
hordi õlad vahetatud.

Näpunäide: eelduse kohaselt $l_3/l_4 = 1$. Tähistame $R_3/R_4 = 1 + \alpha$, kus $|\alpha| \ll 1$ (kui traat ei ole mitte vä-
ga ebaühtlaseks kulunud). Kirjutame üles tasakaalutingimuse
(15.1) mõlema mõõtmise jaoks:

$$R_x = R_2' \frac{R_3}{R_4} = R_2' (1 + \alpha),$$

$$R_x = R_2'' \frac{R_4}{R_3} = R_2'' (1 + \alpha)^{-1}.$$

Arendame $(1 + \alpha)^{-1}$ Newtoni binoomvalemit kasutades ritta,
jätame ära α^2 ja kõrgemad astmed, liidame võrduste vasta-
vad pooled.

15.4. Protokolli vormistamisest

Protokolli algusesse joonestame kasutatava oommeetri
skeemi (joon. 15.3), lisame kõigi tähiste selgituse.

Oommeetri lubatud vea uurimise tulemused kanname ta-
belisse vormi 15.1 järgi.

T a b e l 15.1

Oommeetri lugem α	Absoluutne põhiviga		Suhteline põhiviga	
	$\Delta^{0+}R$	$\Delta^{0-}R$	E_R^{0+}	E_R^{0-}

Esitame mõlema takisti takistuse mõõtmistulemused koos
piirveaga ja kasutatud mõõtepiirkonna äranäitamisega.

Edasi järgneb kasutatud silla skeem (joonis 15.8) koos
tähiste selgitusega, seejärel arvutusvalemid (samuti koos
sümbolite selgitusega).

Mõõtmistulemused esitame koos piirveaga mõlema silla jaoks. Kui tasakaalustamisviga on ignoreeritud, tuleb esitada põhjendus. Kirjutame järelduse kolmel meetodil saadud tulemuste kokkulangevuse kohta.

Protokolli lõpus on järjestik- ja paralleelühenduse takistuse mõõtmise ja arvutuse tulemused ning järeldus kogutakistuse valemite kehtivuse kohta.

Kõik töö sisulised etapid tuleb varustada protokollis alapealkirjadega.

15.5. Kirjandus

1. H. Tamm. Füüsika praktikum. Metroloogia. "Valgus", Tln., 1971.
2. J. Elgas. Elektrimõõtmiste käsiraamat. ERK, Tln., 1963.
3. К.Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.-Л., 1963.

16. MÕÕTMISI ALALISVOOLU KOMPENSATSIOONIMEETODIL

16.1. Tööülesanne

Tutvumine alalisvoolu kompensatsioonimeetodi teooria ja lihtsaimate rakendustega, samuti tööstuslike kompensaatoriga (potentsiomeetritega).

16.2. Kompensatsioonimeetodi teooriast ja kasutatavatest mõõteskeemidest

Alalisvooluallikate elektrimootorjõu mõõtmisel voltmeetriga tekib meetoodiline viga seetõttu, et voltmeetri poolt tarbitav vool tekitab pingelangu vooluallika sisetakistusel. Sama juhtub ka takistit läbiva voolu tekitatud pingelangu mõõtmisel voltmeetriga - voltmeeter šunteerib takisti, pinge sellel muutub. Ka on voltmeetrите täpsus suhteliselt väike - parimate voltmeetrите täpsusklass on 0,05.

Voltmeetri voolutarbest tingitud vea vähendamiseks valitakse voltmeetri sisetakistus palju suurem elektrimootorjõu allika sisetakistusest (või takisti takistusest, millelt mõõdetakse pinget). Mõõteriista voolutarbest tingitud meetoodilisest veast täiesti vaba on kompensatsioonimeetod. See meetod võimaldab mõõtmisel ka palju suuremat täpsust kui parimad voltmeetrid.

Kompensatsioonimeetodi põhiideed selgitab joonis 16.1. Abivooluallikast elektrimootorjõuga E tulev vool tekitab takistil R pingelangu $U = IR$. Mõõdetav elektromootorjõud $E_x < E$ (või pinge $U_x < E$) lülitatakse paralleelselt takisti R osaga AB , millel on kompenseeriv pingelang U_k . Et punktis A on ühendatud vooluallikate samamärgilised poolused, siis, kui on täidetud tingimus

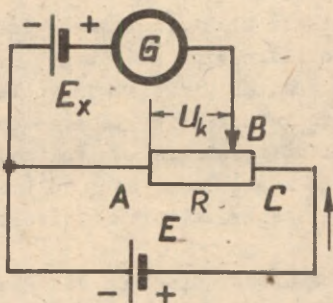
$$U_k = E_x, \quad (16.1)$$

puudub vool läbi mõõdetava elektromootorjõuga E_x elementi

sisaldava ahelaosa. Nüüd on voolu tekitav elektromotoorjõud kompenseeritud pingelanguga U_k - siit ka mõõtmismeetodi nimetus. Kompensatsioon saavutatakse liugkontakti B nihutamisega takistil R, voolu puudumist näitab galvanomeeter G.

E_x mõõtmine on nüüd taandatud U_k mõõtmisele. U_k võiks nüüd mõõta voltmeetriga. Kui voltmeeter on punktide A ja B vahele lülitatud kogu kompenseerimisprotsessi ajaks, siis tema voolutarbest tingitud meetodilist viga ei ole. Suurema täpsuse saavutamiseks määratakse aga U_k seosest

$$U_k = I R_{AB}. \quad (16.2)$$

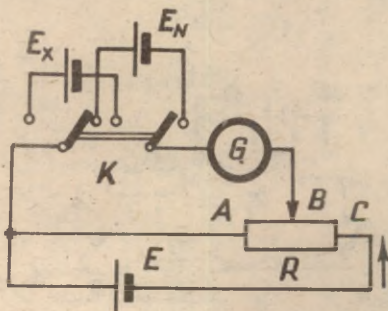


Joon. 16.1. Kompensatsioonimeetodi põhimõtteskeem.

Kui R_{AB} saab mõõta sillaga vajaliku täpsusega, siis I mõõtmisel ampermeetriga on täpsus mitte parem kui U_k mõõtmisel voltmeetriga. Suuremat täpsust võib saada tuntud elektromotoorjõuga elementide kasutamisel. Tänapäeval on sellise elemendina peaaegu eranditult kasutusel Westoni normaalelement [2, lk. 175; 3, lk. 38]. Nagu iga keemiline element, koosneb ka normaalelement kahest elektroodist ja elektrolyüdist. Anoodiks on elavhõbe, katoodiks kaadmiumi ja elavhõbeda sulam (amalgam), elektrolyüüdiks $GdSO_4$ -lahus. Täpsematel elementidel kasutatakse küllastunud lahust, küllastuse garanteerimiseks erinevatel temperatuuridel on elektroo-

dide peal CdSO_4 -kristallide ülejääk. Selliseid elemente nimetatakse küllastatud normaalelementideks. Vähemtäpsetes, nn. küllastamata elementides on kasutusel CdSO_4 küllastamata lahus, mis koos täiteainega moodustab sülditaolise massi. Elektrodid ja elektrolüüt on paigutatud hermeetiliselt suletud H-kujulisse klaasnõusse, kumbki elektrood on H-tähe eri haru põhjas. Küllastatud elemente pole lubatud kallutada vertikaalasendist üle 10° , küllastamata elemendil aga, tänu sülditaolisele elektrolüüdile, on tööasendina lubatud kuni 45° -ne kalle vertikaalist. Lubatust suurema kallutamise järel tuleb küllastamata elemendil lasta vähemalt 24 tundi tööasendis seistes taastuda.

Normaalelementide andmed on toodud Tammeti raamatus [1, p. 24.1]. Küllastatud normaalelementide passis antakse emj. väärtus 20°C juures, töötemperatuuri piirkonnas on täpsustatud väärtus arvutatav vastava valemiga [2, 3]. Küllastamata elementide emj. muutus töötemperatuuride vahemikus ei ületa lubatud põhiviga, seepärast neile temperatuuriparandeid ei arvutata. Küllastamata elemendi lubatav koormusvool ei tohi ületada $10\ \mu\text{A}$.



Joon. 16.2. Kompensatsiooniskeem normaalelemendiga.

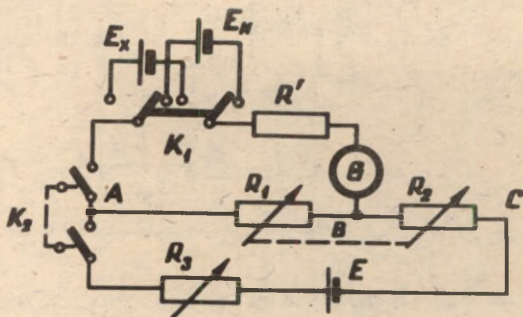
Normaalelemendi kasutamist kompenseeriva pingelangu mõõtmisel selgitab joonis 16.2, kus normaalelement on tähistatud sümboliga E_N . E_X mõõtmiseks tuleb siin teha kaks

operatsiooni - lülitada kordamööda ahelasse E_N ja E_X , saavutada mõlemal korral kompensatsioon ja määrata takistus R_{AB} . Feldades, et abivooluallika emj. E nende operatsioonide tegemise ajal ei muutu, võib voolutugevuse I mõlemas kompensatsiooniolukorras võrdseks lugeda ja kirjutada seosed:

$$\left. \begin{aligned} E_X &= U_K^X = IR_{AB}^X, \\ E_N &= U_K^N = IR_{AB}^N \Rightarrow I = \frac{E_N}{R_{AB}^N} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_X = E_N \frac{R_{AB}^X}{R_{AB}^N}. \quad (16.3)$$

Valemis (16.3) on juba kõik suurused suure täpsusega teada või mõõdetavad.

Joonisel 16.2 kujutatud mõõteskeemil on kaks põhilist puudust. Esiteks tuleb iga emj. või pinge mõõtmiseks teha kaks operatsiooni ja teiseks on takistina R kasutatavatel reohordidel kontakt takistustraadi ja liugkontakti B vahel mitte eriti kindel, kontakti kohal võib tekkida termoelektromotoorjõude, mis toovad mõõtmistulemusse juhuslikke, mittekontrollitavaid vigu. Seepärast kasutatakse kompensatsioonimeetodil töötavates mõõteriistades - kompensatorites e. potentsiomeetrites peaaegu alati joonisel 16.3 kujutatud põhimõtteskeemi.



Joon. 16.3. Kompensaatori põhimõtteskeem.

Enne mõõtmiste algust lülitatakse ümberlülitiga K_1 abil mõõteahelasse normaalelement E_N , valides seejuures $R_1 = R_1^0$ nii suure, et kompenseeriv pinge U_k oleks võrdne normaalelemendi elektromotoorjõuga E_N siis, kui vool läbi mõõtetakistite R_1 ja R_2 on soovitud tugevusega. Tavaliselt valitakse

$$I = \frac{E_N}{R_1^0} = 0,1 \text{ mA} \dots 1 \text{ mA}.$$

Kompensatsioon (s. t. voolu puudumine läbi galvanomeetri G) saavutatakse takisti R_2 takistuse reguleerimisega. Seda operatsiooni nimetatakse töövoolu seadmiseks. Tööstuslikult toodetavates kompensatorites on R_1^0 eraldi takistina ühendatud järjestikku R_1 - ja R_2 -ga, K_1 lülitab normaalelemendi paralleelselt selle takistiga, nii et töövoolu seadmisel on punkti B asukoht suvaline. See võimaldab lihtsalt töövoolu mõõtmiste käigus kontrollida ja vajaduse järele reguleerida.

E_x kompenseerimisel tuleb nüüd muuta R_1 ja R_2 samaaegselt, nii et oleks täidetud tingimus

$$R_1 + R_2 = \text{const}, \quad (16.4)$$

(vt. lisäülesanne B). R_1 ja R_2 kujutavad endast rida järjestikku ühendatud täppistakisteid; R_1 ja R_2 samaaegne muutmine tähendab tegelikult punkti B asukoha muutmist takistite jadas ümberlülitiga abil.

Surunupuga topeltlülitiga K_2 abil lülitatakse vool kogu mõõteskeemi ainult vahetult mõõtmise ajaks, mis pikendab abivooluallika E tööiga. Lülitiga on ehitatud nii, et ta lülitab enne sisse vooluallika ja alles siis mõõdetava või normaalelemendi (vt. lisäülesanne C).

Takisti R' kaitseb galvanomeetrit ja normaalelementi ülekoormuse eest. Kui järele kompensatsioon on saavutatud, lülitatakse ta ahelast välja.

Kui kompenseeritud skeemis E_x muutub veidi (ΔE_x võrra), tekib läbi galvanomeetri vool ΔI_g . Suhet

$$S = \frac{\Delta I_g}{\Delta E_x} \quad (16.5)$$

nimetatakse kompensatsiooniahela tundlikkuseks. On lihtne näha, et S on seda suurem, mida väiksem on ahela mõõtetakisti takistus R (joonisel 16.3 - $R_1 + R_2$) ja mida väiksem on uuritava vooluallika sisetakistus või takistus, millelt pingelangu mõõdetakse. Seepärast on iga konkreetse potentsiomeetri jaoks olemas takistuse ülempiir, millelt saab pingelangu riista poolt lubatava täpsusega mõõta; suuremate takistuste korral mõõtmistäpsus langeb. Tundlikuma galvanomeetri valikuga on võimalik seda viga parandada.

16.3. Elemendi elektrimootorjõu määramine kompensatsiooniskeemi abil

16.3.1. Tööülesanne

Määrata kuivelemendi elektrimootorjõud.

16.3.2. Töövahendid

16.3.3.1. Koostame joonisel 16.3 kujutatud skeemi, kus R_1 , R_2 , R_3 ja R' on takistussalved. R_1 ja R_2 moodustavad koos mõõtetakisti (R , joonis 16.1 ja 16.2). R_3 on töövoolu regulaator, R' on vajalik galvanomeetri ja normaalelemendi kaitseks ülekoormuse eest töö algul, kui kompensatsioon pole veel saavutatud. K_1 on kuue klemmiga ümberlülit, K_2 - surunupuga topeltlülit. Tuleb jälgida, et 1) K_2 ülemised kontaktid (sulguvad varem!) oleksid ühendatud lisavooluallika ahelasse; 2) punktis A oleksid ühendatud lisavooluallika ja E_X ning E_N samanimelised poolused.

16.3.3.2. Arvutame R' minimaalse lubatud algväärtuse. Lähtume ühest halvemast juhust - mingi rikke tõttu ahelas või skeemi valest kokkupanekust tingituna puudub kompenseeriv pingelang täielikult ja normaalelementi ning galvanomeetrit sisaldavas ahelaosas tekib voolu normaalelemendi emj. (≈ 1 V). Jättes arvestamata kõik muud (väikesed) ta-

kistused, arvutame R' väärtuse, mille korral vool selles ahelas ei ületa normaalelemendile lubatud $10 \mu A$ ega galvanomeetri skaala ulatust (arvutame galvanomeetrile märgitud jaotise väärtuse järgi). Seame R' -le arvutatud väärtuse.

16.3.3.3. Valime töövooluks $I = 1 \text{ mA}$, arvutame R_1 algväärtuse R_1^0 , millel valitud töövoolu tugevuse korral tekiks normaalelemendi emj -ga E_N võrdne pingelang:

$$R_1^0 = \frac{E_N}{I}. \quad (16.6)$$

Seame salvele R_1 arvutatud algväärtuse. R_2 algväärtuse R_2^0 valik on vaba, ta ei tohi aga mitte liiga väike olla (vt. lisaülesanne D). Soovitav on valida R_2^0 sellisena, et summa $R_1^0 + R_2^0$ oleks ümmargune arv (miks?).

16.3.3.4. Lülitame K_1 abil ahelasse E_N . R_3 reguleerides saavutame jämeda kompensatsiooniolukorra. Et akult nõutav vool on väike, võib K_2 olla suletud kogu reguleerimise aja (muidugi, kui R' on selnevalt õigesti valitud, nii et galvanomeetri osuti ei lähe tugevasti skaalast välja). Vähendame R' umbes 10 korda, täpsustame kompenseerimist jne., kuni R' väärtus on viidud nullini. Nüüd on töövool läbi R_1 , R_2 , R_3 salvede täpsusega võrdne 1 mA . Korrektsuse mõttes kirjutame R_3 väärtuse üles, R_3 väärtust ei tohi muuta kogu edaspidise töö käigus.

16.3.3.5. Lülitame ahelasse E_X . Et $E_X > E_N$, tuleb nüüd kompensatsiooni saavutamiseks suurendada R_1 , vähendades samaaegselt niisamapalju R_2 . Salvede takistuse juhuslik muutmine ei vii siin sihile, töötada tuleb kindla meetodika järgi. Kõigepealt seame R' jälle maksimaalseks, teeme kindlaks, kuhupoole kaldub galvanomeetri osuti algolukorras (kui $R_1 = R_1^0$ on väiksem kompenseerimiseks vajalikust väärtusest). Suurendame R_1 salve kõige suurema kasutatava dekaadi ühiku võrra, vähendame niisamapalju R_2 . Vajutades K_2 , kontrollime, kas galvanomeetri osuti liigub samale poole kui algasendis. Jätkame samaviisi, kuni osuti liigub teisele poole. Siis on R_1 liiga suur, keerame suurimat dekaadi

ühe võrra tagasi (sama teema ka R_2 -ga!). Tööd jätkame väiksemate dekaadidega sama meetodika järgi, kuni on saavutatud järe kompensatsioon. Siis vähendame R' , täpsustame kompenseerimist jne., kuni $R' = 0$. Kirjutame üles R_1 ja R_2 lõppväärtused, kontrollime võrduse $R_1 + R_2 = R_1^0 + R_2^0$ paikapidavust. Igaks juhuks kontrollime ka, kas R_3 pole juhuslikult muudetud. Arvutame E_X :

$$E_X = I R_1. \quad (16.7)$$

16.3.3.6. Arvutame E_X piirvea. Siin tuleb arvestada, et töövoolu väärtus 1 mA on realiseeritud normaalelemendi emj. ja takistussalvede takistuse täpsusega. Seega tuleb piirvea arvutamisel lähtuda valemist

$$E_X = E_N \frac{R_1}{R_1^0}. \quad (16.7 a)$$

16.4. Pingelangu mõõtmine takistil voltmeetri ja potentsiomeetriga

16.4.1. Tööülesanne

Takistil oleva pingelangu mõõtmine millivoltmeetriga ja tööstusliku potentsiomeetriga. Voltmeetri voolutarbest tingitud meetodilise vea hindamine.

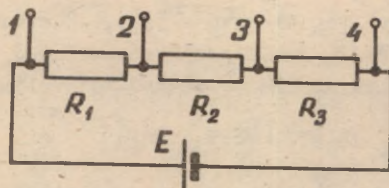
16.4.2. Töövahendid

Millivoltmeeter, potentsiomeeter, takistussalv, vooluallikas (akupatarei), juhtmed.

16.4.3. Töö käik

16.4.3.1. Koostame joonisel 16.4 kujutatud skeemi. R_1, R_2 ja R_3 on ühe takistussalve (tüüp P33) osad, mille vahelt on riista korpusel olevate klemmide alla tehtud väljavõtted. R_3 nimiväärtused on 0 - 0,9 Ω , R_2 -l 0 - 9 Ω , R_1 -l 0 - 999 990 Ω . Pingelangu mõõdame R_2 -l (klemmid 2 ja 3), R_1

kasutame voolutugevuse reguleerimiseks, nii et pingelang R_2 -l jääks mõlema kasutatava mõõteriista mõõtepiirkonda. R_3 väärtus ei mõjуста töö käiku (miks?).



Joon. 16.4. Lülitus pingelangu mõõtmiseks takistil.

16.4.3.2. Kasutada on mitmepiirkonnaline millivoltmeeter, potentsiomeetril on 3 mõõtepiirkonda - 25 mV, 50 mV ja 100 mV. Valime võimalikult kokkulangevate lõppväärtustega mõõtepiirkonnad. Valime R_2 -le mingi suvalise nominaalväärtuse, arvutame voolutugevuse, mille korral R_2 -l tekiks mõõteriistadel valitud mõõtepiirkonna lõppväärtusest veidi väiksem pingelang. Kui leelisaku ühe purgi emj. võrduks 1,25 V, arvutame R_1 väärtuse, mille korral vooluringis (joon. 16.4) oleks eespool arvutatud voolutugevus.

16.4.3.3. Lülitame klemmide 2 ja 3 vahele kordamööda millivoltmeetri ja potentsiomeetri, registreerime näidud. Potentsiomeetriga mõõtmise operatsioonid on sarnased p. 16.3 kirjeldatutega, ainult märksa lihtsustatud. Nende operatsioonide täpsem kirjeldus on toodud tehase poolt kaasaantud kasutamisjuhendis ja selle juurde lisatud lühikokkuvõttes.

16.4.3.4. Arvutame mõlema mõõteriistaga saadud tulemuse piirvea kui mõõteriista lubatud vea. Potentsiomeetri lubatud vea valem on toodud riista kaanel, samuti kasutamisjuhendis. Arvutame metoodilise vea millivoltmeetri kasutamisel millivoltmeetri ja potentsiomeetri näitude vahena.

16.5. Voolutugevuse ja takistuse mõõtmine kompensatsioonimeetodil

16.5.1. Tööülesanne

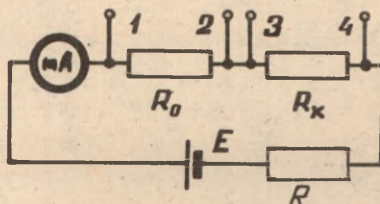
Takistit läbiva voolutugevuse ja takistuse mõõtmine kompensatsioonimeetodil, takistussalvest valitud takistite kombinatsiooni täpsusklassile vastavuse kontrollimine.

16.5.2. Töövahendid

Potentsiomeeter, milliampermeeter, mõõttakisti, mõõdetav takisti (takistussalv), vooluallikas (akupatarei), juhtmed.

16.5.3. Töö käik

16.5.3.1. Koostame joonisel 16.5 kujutatud skeemi. R_0 on suure täpsusega mõõttakisti, R_x on takistussalve madalamiline dekaad nominaaltakistuse väärtustega 0 - 9Ω , R on sama salve kõrgeoomiline osa, mis on tarvilik voolutugevuse reguleerimiseks.



Joon. 16.5. Lülitus voolutugevuse ja takistuse mõõtmiseks kompensatsioonimeetodil.

16.5.3.2. Valime R_x -le mingi suvalise nimiväärtuse R_x^n . Arvutame maksimaalse lubatud voolutugevuse, mille korral pingelangud R_0 -l ja R_x^n -l ei ületa potentsiomeetri mõõtepiirkonda (näit. 50 mV). Lugeses leelisaku ühe purgi emj. võrdseks 1,25 V, arvutame salve kõrgeoomilise osa R takistuse, nii et voolutugevus ahelas (joon. 16.4) kasutatava akupata-

rei korral ei ületaks eespool arvatud väärtust. Valime milliampermeetri sobiva mõõtepiirkonna.

16.5.3.3. Mõõdame potentsiomeetri abil pinged mõõttakistil (klemmid 1 ja 2) ja mõõdetaval takistil (klemmid 3 ja 4). Registreerime milliampermeetri näidu I' . Arvutame voolutugevuse ja takistuse täpsemad väärtused kompensatsioonmõõtmiste tulemuste kaudu:

$$I = \frac{U_{R_0}}{R_0}, \quad (16.8)$$

$$R_X = \frac{U_{R_X}}{I} = R_0 \frac{U_{R_X}}{U_{R_0}}. \quad (16.9)$$

16.5.3.4. Määrame I' , I ja R_X piirvead kui mõõteriistade lubatud vead. Võrdleme mõõtmistäpsusi voolutugevuse mõõtmisel ampermeetriga ja kompensatsioonimeetodil. Arvutame nimitakistuse R_X^n lubatud vea ΔR_X^n salve täpsusklassi kaudu. Kontrollime, kas valitud takistite kombinatsioon nimitakistusega R_X^n vastab salve täpsusklassile (s. t. kas mõõtmistulemuse usalduspiirid $R_X + \Delta R_X$ ja $R_X - \Delta R_X$ ei erine R_X^n -st rohkem kui ΔR_X^n võrra).

16.6. Lisaülesandeid

16.6.1. Enne praktikumi:

A. Joonestada elemendi emj. ja takistil oleva pingelangu voltmeetriga mõõtmise lülituste skeemid. Selgitada voltmeetri voolutarbest tingitud meetodilise vea tekkimist.

B. Miks skeemis joonisel 16.3 peab kõigi reguleerimiste korral jääma täidetuks tingimus $R_1 + R_2 = \text{const}$?

C. Mis juhtuks, kui E_N või E_X lülitada skeemi enne E (vt. joon. 16.2)?

D. Võttes kuivelemendi $E_X \approx 1,5 \text{ V}$, arvutada R_2 minimaalne lubatud algväärtus töövoolu tugevuse 1 mA korral (vt. p. 16.3.3.3 ja joon. 16.3).

E. Joonestada kompensatori skeem, milles töövoolu

seadmiseks on eraldi takisti R_1^0 . Lähtuda skeemist joon. 16.3. Kuhu võib paigutada R_1^0 ?

16.7. Protokolli vormistamisest

Protokolli alguses refereerime väga lühidalt kompensatsioonimeetodi ideed. Järgnevad alapealkirjadega varustatud mõõtmisülesanded. Iga ülesande jaoks joonestame kasutatava lülituse skeemi (joon. 16.3, 16.4, 16.5) ja kirjutame tulemuste arvutamise valemid; toome ära nii skeemil kui valemites esinevate tähistuste selgituse. Iga ülesande korral esitame mõõtmistulemused koos piirvigadega, samuti (kirjalikult) ülesandes nõutud järeldused.

16.8. Kirjandus

1. H. Tammet. Füüsika praktikum. Metroloogia. "Valgus", Tln., 1971.
2. J. Leng jt. Füüsika praktikum. ERK, Tln., 1960, lk. 173-176; 200 - 203).
3. K. B. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.-Л., с. 253-303.

17. ELEKTRONOSTSILLOGRAAFIGA TUTVUMINE

17.1. Tööülesanne

Tutvumine elektronostsillograafi ehituse ja mõnede kasutamisevõimalustega.

17.2. Töövahendid

Elektronostsillograaf Cl-1, voltmeeter, trafo, autotrafo, helisagedusgeneraator, lampvoltmeeter, juhtmed.

17.3. Ostsillograafi ehitus ja tööpõhimõte

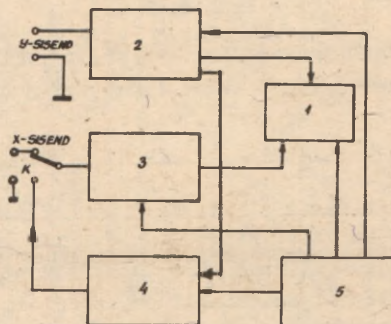
17.3.1. Ostsillograafi otstarve ja plokkskeem. Elektronostsillograaf on riist kiirete elektriliste protsesside jälgimiseks (vajaduse korral ka fotografeerimiseks). Ostsillograafi abil võib jälgida mingit protsessi iseloomustavate kõverate (s. t. protsessis muutuvate füüsikaliste suuruste vaheliste sõltuvuste graafikute) kuju, mõõta protsessi või selle osade kestust, protsessi sagedust. Sageli kasutatakse ostsillograafi vahelduvpinge mõõtmisel; asendamatult on ta üksikute lühiajaliste pingepulsside mõõtmisel.

Elektronostsillograafi töö analüüsimisel jagatakse see funktsionaalseteks sõlmedeks ehk plokkideks (joon. 17.1). Ostsillograafi põhiplokkideks on elektronkiiretoru (1), sisendsignaali võimendid (2) ja (3), kallutuspinge generaator (4) ja toiteplokk (5). Noolega on tähistatud plokkide vastastikused seosed.

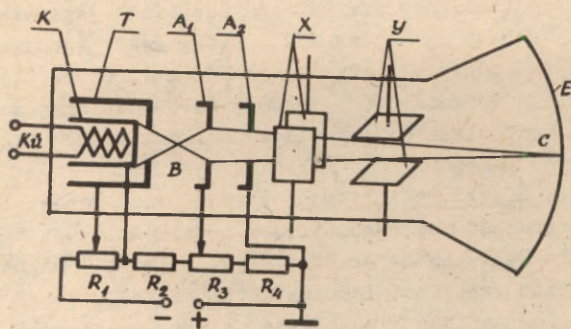
17.3.2. Elektronkiiretorud võivad olla kahte tüüpi: elektrostaatilised või magnetilised. Esimest tüüpi torudes toimub kiire kallutamine elektrivälja, teistes - magnetvälja mõjul. Siin vaatleme elektrostaatilise kallutusega toru, sest ostsillograafides kasutatakse peaaegu eranditult selliseid.

Elektronkiiretoru ehitus on järgmine (joon. 17.2). Elektronide allikaks on kaudse küttega silindriline katood

K, mida kuumutatakse kütteniidiga Kü. Katoodi ümbritseb avaga varustatud tüüriv elektrood T, millele antakse katoodi suhtes väike negatiivne pinge. Muutes tüüriva elektroodi negatiivset pinget, muudame väljuvate elektronide arvu, millest omakorda sõltub toru fluorestseerival ekraanil tekkiva elektronkiire jälje heledus.



Joon. 17.1. Elektronostsillograafi plokk skeem.



Joon. 17.2. Elektrostaatilise kallutusega elektronkiiretoru.

Elektroodid A_1 ja A_2 moodustavad anoodide süsteemi, neile antakse kõrge positiivne pinge katoodi suhtes. Elektrivälja toimetel, mis tekib katoodi ja tüüriiva elektroodi ning esimese anoodi A_1 vahele rakendatud pinge tõttu, koonduvad katoodi pinnalt eraldunud elektronid punktis B esimese anoodi lähedal. Pärast punkti B elektronkiirte kimp laieneb, sest väljatugevus silindrikujulise esimese anoodi sees on lähedane nullile. Esimese ja teise anoodi vahel kõverdab elektrivälja uuesti elektronide trajektoore, lähendades neid toru teljele ja elektronkiirte kimp fokuseerub ekraanil punktis C. Ekraan E on valmistatud fluorestseerivast materjalist, mis elektronidega pommitamisel hakkab vastavas kohas helenduma (nn. katoodluminestsentsi nähtus).

Elektroodide süsteeme, mis koondavad või hajutavad elektronkiirte kimpu, nimetatakse elektronoptilisteks läätsedeks.

Kogu kirjeldatud süsteemi, mis koosneb katoodist, tüüriivast elektroodist ja anoodidest, nimetatakse elektronkahuriks.

Takistid R_1 , R_2 , R_3 ja R_4 moodustavad pingejaguri, millelt antakse elektroodidele vastavad pinged. R_1 abil muudetakse täpi heledust, R_3 abil aga fokuseeritakse kiirt.

Elektronkiire tee ja seega ka fokuseerimispunkti asukoha muutmiseks on torus kaks paari omavahel risti asetatud kallutusplaate: vertikaal- ehk X-plaadid ja horisontaal- ehk Y-plaadid. Kallutusplaatide paarid kujutavad endast tasaparralleelseid kondensaatoreid. Kui kõigile kallutusplaatidele anda anoodi A_2 potentsiaal, siis plaadid ei mõjuta elektrone ja kiire jälg tekib ekraani tsentrisse. Kui aga rakendada kallutusplaatide vahele pinge (tavaliselt vähendatakse ühe ja suurendatakse teise plaadi potentsiaali, nii et keskmise potentsiaal jääks võrdseks A_2 omaga), siis kalduvad elektronid kondensaatori homogeenses elektriväljas liikudes esialgselt suunast kõrvale. Kiire jälje nihke ekraani keskpunktist osutub võrdeliseks plaatide vahele rakendatud pingega. Kahe paari kallutusplaatide vahelise pinge muutmisega saab viia kiire jälje mistahes punkti ekraanil, kusjuures

pinge muutus ja jälje nihe ekraanil vertikaal- või horisontaalsihis on üheselt (võrdeliselt) seotud. See võimaldab joonistada ekraanil kallutusplaatidele rakendatud kahe muutuva pinge (elektrilise signaali) vahelise sõltuvuse graafikut (ostsillogrammi).

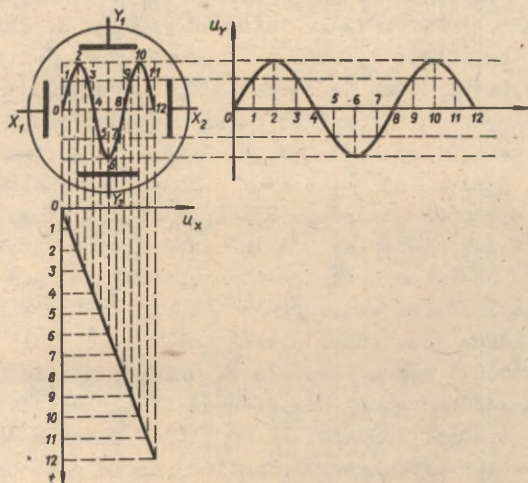
17.3.3. Ostsillogrammi tekitamine. Olgu näiteks X -plaatidele antud ajas lineaarselt muutuv pinge U_x , Y -plaatidele aga ajas sinusidaalselt muutuv pinge U_y . Siis elektroni jälje X - ja Y -koordinaadid (horisontaal- ja vertikaalnihked ekraani keskpunktist) sõltuvad ajast järgmiselt:

$$\begin{cases} X = a t, \\ Y = b \sin(\omega t + \varphi). \end{cases} \quad (17.1)$$

Neid seoseid võib vaadelda kui joone $Y = f(X)$ parameetrilisi võrrandeid. Selle joone võrrandit ennast on siit lihtne saada:

$$Y = b \sin\left(\frac{\omega}{a} X + \varphi\right). \quad (17.2)$$

Ostsillograafi toru ekraanil tekib sinusoid. See on ka funktsiooni $U_y = f(U_x)$ graafik. Selle graafiku tekkimise protsessi toru ekraanil selgitab joonis 17.3. Et U_x oli



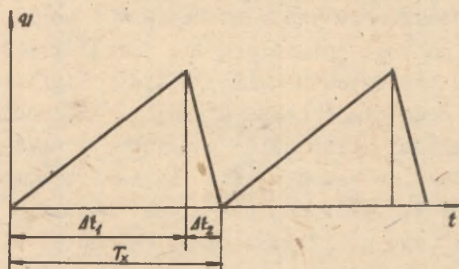
Joon. 17.3. Ostsillogrammi tekkimine.

võrdeline ajaga, siis näitab ostsillogramm U_y sõltuvust ajast.

Kui anda ühele kallutusplaatide paaridest ajas sinusooidselt muutuv pinge, siis hakkab kiire jälg ekraanil võnkuma harmooniliselt kas vertikaal- või horisontaalsihis. Kui aga anda mõlemale plaadipaarile samaaegselt sinusoidsaalne pinge, siis tekib kiire jälje liitliikumine mõõda trajektoori, mida nimetatakse Lissajous' kujundiks. Trajektoori kuju sõltub plaatidele antavate pingete sageduste suhtest ja faaside vahest. Kui sageduste suhe on väike täisarv (1, 2, 3, ...), on Lissajous' kujundid võrdlemisi lihtsa kujuga (vt. p. 17.5.5, lisaülesanne C) kinnised kõverjooned.

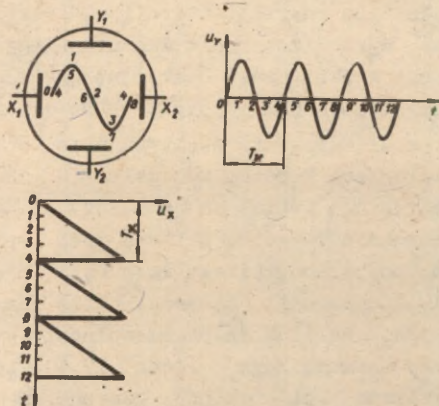
Eristatakse ostsillograafi kaht töörežiimi, mille vahel toimub lülititi K abil (joon. 17.1). Ühe režiimi korral antakse kummalegi kallutusplaatide paarile väline signaal, ostsillogramm kujutab elektronikiire jälje nende signaalide mõjul toimuvat liitliikumist. Teisel juhul jälgitakse ühe signaali sõltuvust ajast. Vastavalt eelöeldule tuleb siis ühele kallutusplaatide paarile (tavaliselt vertikaalsetele plaatidele) anda ajas lineaarselt muutuv pinge. Ekraanil saadakse siis uuritava signaali ühekordne graafik, mis kiire protsessi korral pole hästi jälgitav. Et ekraanil tekiks perioodilise signaali graafiku püsiv kujutis, on tarvis, et ühekordne ostsillogramm korduks vähemalt 10 - 20 korda sekundis (nägemisaistingu kestus on ca 0,1 s) ja üksikud ostsillogrammid kattuksid täpselt. Selleks peab X-plaatide lineaarne pingemuutus perioodiliselt korduma. Pinge peab teatud aja jooksul lineaarselt kasvama, siis järsku kaduma, uuesti kasvama jne. Sellist nn. hammaspinget (graafik sarnaned pikipuu sae hammastikuga) (joon. 17.4) tekitab ostsillograafis sisemine kallutuspinge generaator (plokk 4, joon. 17.1). Hammaspinge mõjul liigub täpp ekraanil algul ühtlaselt vasakult paremale, siis "hüppab" kiiresti algasendisse tagasi. Joonisel 17.4 on tähistatud vastavad ajavahemikud Δt_1 ja Δt_2 . Peab olema täidetud tingimus

$\Delta t_2 \ll \Delta t_1$ (ideaalne oleks $\Delta t_2 = 0$, see pole praktikas saavutatav). Tagasihülpe ajaks kiir kustutatakse (vt. lisa-ülesanne A).



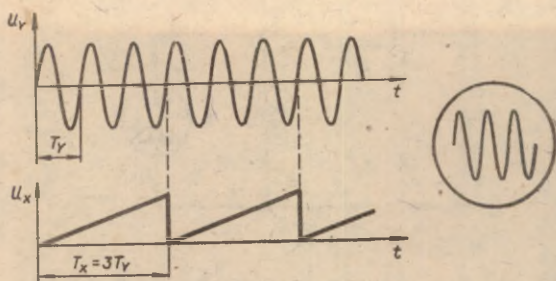
Joon. 17.4. Kallutuspinge ajaline sõltuvus.

Kui uuritava signaali periood T_y ja hammaspinge periood T_x on võrdsed, siis tekib ekraanil uuritava pinge ühe perioodi graafiku püsiv kujutis (joon. 17.5). Kui $T_x = n T_y$



Joon. 17.5. Ostsillogramm juhul $T_x = T_y$.

(n on täisarv), siis saame ostsillogrammil uuritava pinge n perioodi graafiku (joon. 17.6).



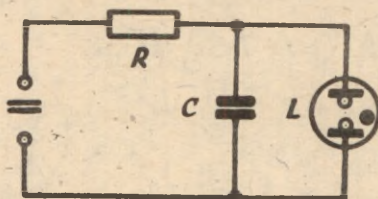
Joon. 17.6. Ostsillogramm juhul $T_x = 3 T_y$.

17.3.4. Sünkroniseerimine. Kui tingimus $T_x = n T_y$ pole täpselt täidetud, hakkab pilt ekraanil liikuma X-telje suhtes. Nii T_x kui T_y võivad juhuslike põhjuste tõttu muutuda, seepärast on liikumatu pildi saamiseks tarvis kasutada sünkroniseerimist (sama-ajastamist). Uuritava signaali või mendi (Y-võimendi) sidestatakse kallutusgeneraatoriga; hammaspinge generaatori sagedust muudetakse automaatselt nii, et hammaspinge perioodid algaksid alati uuritava pinge sama faasi juures. Sünkroniseerimiseks antava signaali tugevus on reguleeritav. Mõnikord kasutatakse sünkroniseerimiseks kas võrgusagedusega pinget või mingit välist signaali, mis antakse eriklemmi kaudu. Sünkronisatsioonisignaali allika valik toimub vastava ümberlülitite abil.

17.3.5. Lihtsaima hammaspinge generaatori põhimõtteline elektriline skeem (joon. 17.7) koosneb takistist R , kondensaatorist C ja gaastäitega lambist L .

Skeemi pingestamisel hakkab kondensaator C üle takisti R laaduma. Teooriast on teada, et pinge kondensaatoril muutub eksponentsiaalse seaduse järgi. Kui pinge kondensaatoril on jõudnud huumlambi süttimispingeni, tekib lambis L

laviinitaoline lahendus ja kondensaator tühjeneb kiiresti. Skeemi parameetrite sobiva valikuga on võimalik saavutada olukorda, kus teatavas sagedusvahemikus eksponentsiaalkõve-



Joon. 17.7. Lihtsaim hammaspinge generaator.

ra lõigud on väga lähedased sirgloikudele (joon. 17.4). Samuti on parameetrite suuruse variëerimisega võimalik saada erineva sagedusega hammaspinget. C on tavaliselt muudetav astmeliselt, R aga pidevalt.

17.3.6. Sisendsignaaside võimendid on selleks, et vajaduse korral nõrka signaali enne kallutusplaatidele juhtimist võimendada. Liiga lugevaid signaale saab enne võimendisse juhtimist astmeliselt nõrgendada.

17.3.7. Toiteplokk on vajalik elektronkiiretoru ja kõi- kide lampide kütmiseks ja pingestamiseks. Ta koosneb alal- dist lampide toiteks ja kõrgepingealaldist toru pingestami- seks.

17.4. Ostsilloograafi põhiparameetrid

17.4.1. Tundlikkuseks nimetatakse helenduva täpi kõr- valekallet ekraanil vastavatele siseklemmidele rakendatud lühikulise pinge mõjul. Tundlikkus määratakse eraldi X - ja Y -teljel; tavaliselt on see reguleeritav. Kui tundlikkuse γ määramiseks rakendatakse kallutusplaatidele sinusoi- daalne pinge, siis arvutatakse γ valemist

$$\gamma = \frac{L}{2\sqrt{2}U}, \quad (17.3)$$

kus L on helendava joone pikkus ekraanil, U - pinge efektiivväärtus (möödetakse voltmeetriga).

Tundlikkuse teadmine võimaldab kasutada ostsillograafi pinge mõõtmiseks.

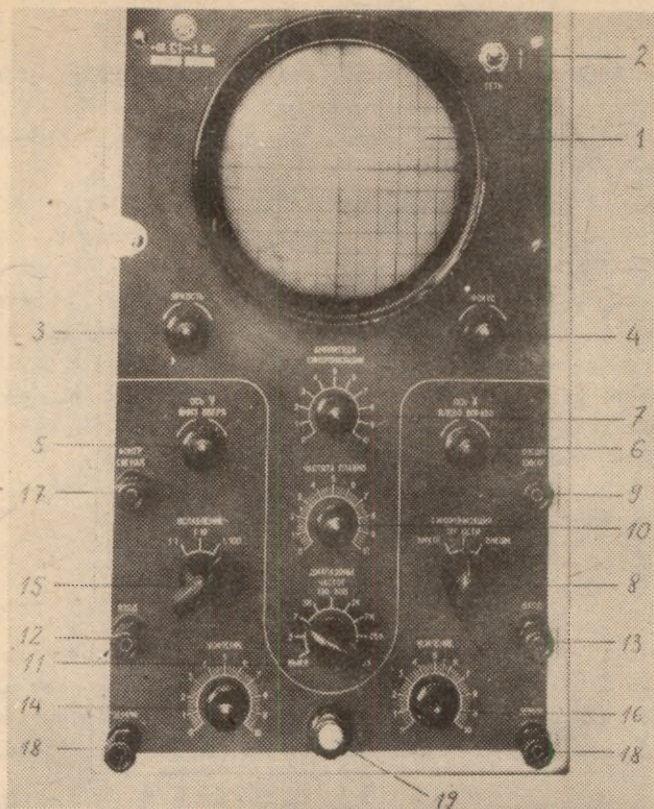
17.4.2. Läbilaskeriba. Ostsillograafi tundlikkus sõltub sagedusest. See on sisendsignaali võimendi omadus. Sagedusvahemikku, mille ulatuses tundlikkus pole vähenenud rohkem kui $\sqrt{2}$ korda maksimaalsest tundlikkusest, nimetatakse läbilaskeribaks. Läbilaskeriba määratakse vastava sisendi sageduskarakteristikult, s. o. graafikult, mis näitab tundlikkuse sõltuvust sisendpinge sagedusest. Mõnedel ostsillograafidel on läbilaskeriba altpoolt piiramata, neid nimetatakse alalispinge ostsillograafideks.

17.4.2. Kallutusgeneraatorit iseloomustavad hammaspinge perioodi maksimaalne ja minimaalne väärtus.

17.5. Töö käik.

17.5.1. Ostsillograafi käsitlemine. Elektronostsillograafi Cl-1 detailid on monteeritud metallkastis asuvale šassiile ja juhtimisseadmed on välja toodud esiplaadile. Esiplaadil on järgmised lülitid ja regulaatorid (joonis 17.8).

- 1) elektronkiiretoru ekraan;
- 2) võrgulüliti;
- 3) helendava täpi (kujutise) heleduse regulaator (muudab pinget tüüriaval elektroodil);
- 4) kiire teravustaja;
- 5) kiire nihutaja Y-teljel;
- 6) kiire nihutaja X-teljel;
- 7) sünkroniseeriva pinge amplituudi regulaator;
- 8) sünkroniseerivate pingeallikate ümberlülitid;
- 9) klemm välise sünkronisatsiooni ühendamiseks;
- 10) kallutuspinge sageduse pidev regulaator;



Joon. 17.8. Ostsillograafi CI-1 esipaneel.

11) Kallutuspinge generaatori sageduse astmeline lüüti 2 Hz kuni 50 kHz; kui lüüti on näiteks asendis 7, siis kallutuspinge pidev regulaator katab vahemiku 7 Hz kuni 30 Hz; asendis "ВЫКЛ." (see vastab lüüti K ülemisele asendile plokkskeemil joon. 17.1) on kallutuspinge generaator välja lülitatud ja X-telje sisendklemmidele antav signaal antakse võimendi kaudu X-kallutusplaatidele;

12) Y-telje sisendklemm uuritava pinge ühendamiseks;

- 13) X-telje sisendklemm uuritava pinge ühendamiseks;
- 14) Y-telje võimendi võimenduse regulaator (tundlik-kuse regulaator Y-teljel);
- 15) Y-telje võimendi sisendsignaali astmeline nõrgendi;
- 16) X-telje võimendi võimenduse regulaator (tundlik-kuse regulaator X-teljel);
- 17) kontrollsignaali klemm (2,5 V, 50 Hz);
- 18) maandusklemmid;
- 19) signaallamp.

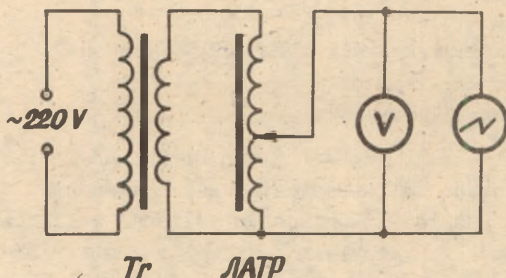
Ostsillograafi tagaseinal on klemmlaud, mille klemmid on otseühenduses kallutusplaatidega. Normaalses tööolukorras on kallutusplaadid ühendatud võimendi väljunditega. Samal klemmlaua asuvad klemmid kiire heleduse moduleerimiseks (vajaduse korral). Normaalses tööolukorras on modulaator välja lülitatud, heledust tüüriv elektrood ühendatud heleduse regulaatoriga.

Tutvume kõigi juhtimisorganite paigutusega. Pöörame tundlikkuse regulaatorid nullasendisse (maksimaalselt vastukella). Ühendame ostsillograafi valgustusvoolu võrku ja lülitame võrgulüliti sisse. Süttib signaallamp; umbes minuti möödudes peab ekraanil ilmuma helenduv täpp. Kui seda ei juhtu, suurendame kiire heledust. Kui ka see ei mõju, nihutame kiirt piki X- ja Y-telge, kuni täpp asetub ekraani tsentrisse. Paigalseisva täpi heleduse reguleerime nüüd minimaalseks, muidu kõrbeb ekraani luminofoor. X-telje võimenduse suurendamisega (kallutuspinge generaator ei ole välja lülitatud!) tekitame ekraanil horisontaalse joone.

17.5.2. Võrgupinge kuju jäljendamiseks ühendame klemmi "Контрольный сигнал" Y-sisendi ülemise klemmiga. Sagedusdiapasoonide astmelise lüliti (11) (joon. 17.8) paneme asendisse 30. Sünkroniseerivate pingeallikate ümberlülitati 8 asendisse "Внутр" või "Синхронизация от сети" nupu "Ослабление" asendisse 1:10. Nupu "Усиление y" abil reguleerime kõvera amplituudi parajaks, nuppude "Частота плавно" ja "Амплитуда синхронизации" abil saame ekraanile paigalseisva kujutise. Muutes kallutuspinge generaatori sage-

dust astmelise lüliti (11) abil, püüame ekraanile saada ühe, kaks, kolm jne. siinusfunktsiooni täisperioodi.

17.5.3. Tundlikkuse määramine Y-teljel. Koostame vooluringi vastavalt joon. 17.9 kujutatud põhimõtteskeemile.



Joon. 17.9. Tundlikkuse määramise lülituse põhimõtteskeem.

Trafo Tr alandab võrgupinget 10 - 12 V-ni, autotrafo LAMP võimaldab reguleerida ostsillograafi sisepinget sujuvalt 0-st kuni Tr väljundpingeni. Sisendpinge suurust näitab voltmeeter V. Kallutuspinge generaatori lülitame välja (kuidas?).

Määrame tundlikkuse Y-teljel võimenduse regulaatori nupu (14, joon. 17.8) asendites 1 - 10. Sisendpinge astmeline nõrgendi peab olema asendis 1:100 (miks?). Anname sisendisse pinge U_y ja mõõdame vertikaalse helenduva joone pikkuse l_y ekraanil, kasutades ekraani ees olevat millimeetriskaalat. Andmed kanname tabelisse, kuhu on jäetud ruumi ka arvutustulemuste jaoks (vt. p. 17.6, tabel 17.1).

Tundlikkuse δ_y arvutame valemist (17.3). Suhteline piirviga $\frac{\Delta y}{y}$ on U_y ja l_y suhteliste piirvigade summa. Et l_y absoluutne viga ei olene joone pikkusest, siis on ilmselt kasulik valida joon võimalikult pikem. Elektronikiiretoru ekraani kumeruse tõttu on ekraani äärtel mõõtmisel võimalik

suur parallaktiline viga. Seepärast reguleerime helenduva joone pikkuseks alati ligikaudu $2/3$ ekraani läbimõõdust. Selleks vajaliku sisendpinge määramisel valime voltmeetri piirkonna nii, et U_y suhteline piirviga oleks minimaalne võimalik.

Piirvead $\frac{\Delta x}{x}$ ja Δy arvutame ainult tabeli kolme rea jaoks - alguses, lõpus ja keskel.

17.5.4. Y-telje võimendi sageduskarakteristika määramine. Ühendame Y-telje sisendklemmidega helisagedusliku vahelduvpinge generaatori (helisagedusgeneraatori) väljundpinge klemmid. Kui helisagedusgeneraatoril puudub väljundpinge määramiseks voltmeeter, siis ühendame samadele klemmidele lampvoltmeetri, mille normaalsagedusvahemik sisaldab helisagedusi (20 Hz - 20 kHz). Reguleerime helisagedusgeneraatori väljundpinge väärtuse selliseks, et see langeks lampvoltmeetri mingi skaalapiirkonna lõpuossa ja helenduva joone pikkus ostsillograafi ekraanil võimenduse regulaatori mingis (eelmises punktis gradueeritud) asendis oleks umbes $2/3$ ekraani läbimõõdust. Mõõdame joone pikkused ekraanil sisendpinge mitmesugustel sagedustel f (näiteks 20, 70, 200, 700, 2000, 7000 ja 20 000 Hz), hoides sisendpinge väärtuse konstantsena. Selleks tuleb helisagedusgeneraatori väljundpinget sageduse igakordsel muutmisel järele reguleerida. Andmed kanname tabelisse vastavalt p. 17.6 toodud vormile 17.2.

Joonestame sisendkarakteristika graafiku teljestikus $\log f - y$. Milleks on antud juhul tarvilik kanda X-teljele $\log f$ (mitte f)? Märgime ka läbilaskeriba piirid (vt. p. 17.4.2), kui need jäävad uuritud sagedusvahemiku piiridesse.

17.5.5. Lissajous' kujundite jälgimiseks anname X-sisendisse pinget vastavalt joonisele 17.9, Y-sisendisse aga helisagedusgeneraatorist. Kallutuspinge lüliti (11) (joonis 17.8) asendisse "ВНХЛ." Ekraanil saame jälgida kujundeid, mis tekivad kahe ristsihilise erineva sagedusega siinuse-

lise võnkumise liitumise tulemusena. X-sisendisse antava pinge sagedus on 50 Hz, helisagedusgeneraatorist anname Y-sisendisse pinge sagedusega 50, 75, 100, 150 ja 200 Hz. Viisandame saadud kujundid protokollile.

Lissajous' kujundite abil määratakse praktikas sageli uuritava signaali sagedust tuntud (reguleeritava) sagedusega võrdlemise teel.

17.5.6. Kallutuspinge generaatori gradueerimine. Tuleb leida nuppude (11) ja (10) (joon. 17.8) kindlatele asenditele vastavad kallutuspinge generaatori sagedused hertsides. Kallutuspinge generaatori sagedus on võrdne helisagedusgeneraatori sagedusega siis, kui ostsillograafi ekraanil on sinusoidi üks täisperiood.

Lülitame helisagedusgeneraatori Y-sisendile. Asetame lüliti "Диапазон частот" mingisse kindlasse asendisse. Nupu "Частота плавно" kõigi asendite jaoks püüame helisagedusgeneraatorist tuleva signaali sageduse muutmise teel saada ekraanil ühe sinusoidi. Vastavad sagedused registreerime. Katse ajal peab nupp (8) olema asendis "Внешн." (miks?). Andmed koondame tabelisse vastavalt p. 17.6 toodud vormile 17.3.

Joonestame graafiku, kandes horisontaalteljele kallutuspinge pideva regulaatori nupu asendid, vertikaalteljele helisagedusgeneraatori vastavad sagedused, märkides juurde ka kallutuspinge generaatori sageduse astmelise lüliti asendi.

Graafikule kanname ka veakoridori. Sageduse teljel on piirviga määratud helisagedusgeneraatori lubatud veaga: $\Delta f = 0,02 f + 1 \text{ Hz}$. Nupu asendi võimaliku vea määramiseks teeme nupu ühes suvalises asendis sellise katse: nihutame ära helisagedusgeneraatori sageduse ja nupu asendi, seame nupu jälle samasse asendisse tagasi ja määrame sageduse, mille korral tekib ekraanil 1 sinusoid. Seda katset kordame 10 korda, leiame saadud sageduste keskmise ja arvutame ruutkeskmise hälbe σ [2, lk. 146, 163]. Graafikult määrame, kui palju peab nuppu valitud asendist pöörama, et sagedus muutuks 3 σ võrra. See ongi nupu ühekordsel paikapanemisel

asendi võimaliku juhusliku vea ülemmäär ja selle loeme nupu asendi veaks kõikides asendites.

17.6. Protokolli vormistamisest

Protokolli algusesse joonestame ostsillograafi plokkskeemi, esitame plokkide nimetused koos nende otstarbe lühikirjeldusega. Esitame tundlikkuse ja selle piirvea arvutusvalemid koos tähiste selgitusega.

Tööülesande 17.5.1 täitmist kajastame protokollis ostsillograafi sisselülitamise ja täpi ekraani tsentrisse seadmise protseduuri lühikirjeldusena. Kirjeldame, kuidas saab ekraanil tekitada horisontaalse joone. Ülesande 17.5.2 täitmisel joonestame (skitseerime) võrgupinge graafiku, mida näeme ekraanil.

Edasi joonestame tundlikkuse määramisel kasutatava lülituse skeemi (koos tähistuste selgitusega). Tundlikkuse määramiseks vajalikud mõõtmis- ja arvutustulemused esitame tabelis järgmise vormi järgi:

T a b e l 17.1

Y-võimendi nupu asend	U_y/V	l_y/mm	$\delta_y/\frac{mm}{V}$	$\Delta\delta_y/\frac{mm}{V}$	$\frac{\Delta\delta_y}{\delta_y}$

Y-võimendi sageduskarakteristika määramiseks vajalikud mõõtmistulemused kanname tabelisse vormi 17.2 järgi. Ehitame millimeetripaberil sageduskarakteristika graafiku, määrame läbilaskeriba.

Y-võimendi nupp asendis ...

Sisendpinge $U_y = \dots V$

T a b e l 17.2

$f / \text{Hz} /$	$l_y / \text{mm} /$	$\gamma_y / \frac{\text{mm}}{V} /$

Kui läbilaskeriba piirid ei jää kasutada olnud sagedusvahemikku, tuleb see tõsiasi kirjalikult protokollis esitada.

Edasi järgnevad Lissajous' kujundite skitsid. Igale kujundile märgime juurde sagedused f_x ja f_y . Esitame Lissajous' kujundite kasutamisel põhineva sageduse mõõtmise protseduuri lühikirjelduse.

Kallutuspinge generaatori gradueerimise andmed esitame tabelis vormi 17.3 järgi.

T a b e l 17.3

Kallutusgeneraatori sageduse astmelise regulaatori nupp asendis ...

Kallutusgeneraatori sageduse pideva regulaatori nupu asend	Helisagedusgeneraatori sagedus $f / \text{Hz} /$	Sageduse piirviga $\Delta f / \text{Hz} /$

Nupu asendi juhusliku vea määramise andmed esitame va-
ba vormi järgi. Et standardhälbe σ arvutame kalkulaatori-
ga (näit. "Электроника БЗ-18") esitame kohe σ väärtuse
ilma vahearvutusteta. Graafiku koos veakoridoriga ehitame
millimeetripaberil.

17.7. Lisaülesandeid

17.7.1. Enne praktikumi:

A. Kuidas saab elektronkiirt tagasihüppe ajaks kustutada (vt. p. 17.3.3)?

B. Selgitada graafiliselt (joonisel), kummale poole hakkab liikuma pilt ostsillograafi ekraanil, kui $T_x < T_y$.

C. Konstrueerida (millimeetripaberil) joon.17.3 eeskujul Lissajous' kujund juhu jaoks, kui mõlemale sisendile on antud sama sagedusega sinusoidaalne pinge, kusjuures ajamomendil $t = 0$ on mõlemas sisendis pinge null (siinused on samas faasis). Pingete amplituudväärtused võtta erinevad ($U_y \max = \frac{1}{2} U_x \max$).

D. Oletame, et p. 17.5.4 antud ülesande täitmisel osutub, et joone pikkus l_y ei sõltu sagedusest kasutada oleva sagedusvahemiku piires. Kas see on hea või halb?

E. Miks valemis (17.3) on nimetajas kordajad 2 ja $\sqrt{2}$?

17.7.2. Pärast praktikumi:

F. Oletame, et tundmatu sinusoidaalse pinge mõõtmisel oli Y-võimendi nupu asendis 5 vertikaalse joone pikkus ekraanil 78 ± 1 mm. Leida tabeli 1 andmetel selle pinge efektiiv- ja amplituudväärtus koos piirveaga.

G. Oletame, et tundmatu sageduse mõõtmisel gradueeritud kallutusgeneraatorit kasutades tekkis ekraanil üks sinusoid kallutusgeneraatori sageduse pideva regulaatori nupu asendis 6,4. Määrata töös saadud gradueerimisgraafikult tundmatu signaali sagedus koos piirveaga.

17.8. Kirjandus

1. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. Tln., ERK, 1960, lk. 256 - 263.
2. H. Tammet. Füüsika praktikum. Metroloogia. Tln., "Valgus", 1971.

S i s u k o r d

Eessõna	2
9. Nurkade ja kauguste mõõtmine teodoliidiga . . .	3
10. Kaalumise summutiga analüütilisel kaalul	13
11. Mõõtekolvi gradueerimine	22
12. Aegrelee gradueerimine	27
13. Termoelemendi valmistamine ja gradueerimine . .	36
14. Elektrimõõteriistade gradueerimine ja taatlemine	48
15. Juhtide takistuse mõõtmine	59
16. Mõõtmisi alalisvoolu kompensatsioonimeetodil . .	73
17. Elektronostsillograafiga tutvumine	85

РАБОЧЕЕ РУКОВОДСТВО ПРАКТИКУМОМ ПО ОБЩИМ ИЗМЕРЕ-
НИЯМ II. Составитель Эдуард Т а м м. На эстон-
ском языке. Тартуский государственный универси-
тет, ЭССР, г. Тарту, ул. Кликооли, 18.
Vastutav toimetaja H. Oks. Korrektor V. Lang.
Paljundamisel antud 21.09.1979. Kirjutuspaber
30x42 1/4. Trükipoognaid 6,5. Tingtrükipoognaid
6,05. Arveetuspoognaid 5,61. Trükiarv 500. TRÜ
trükiakoda, ENSV, Tartu, Palsoni t. 14. Tell.nr.
1275. Hind 20 kop.

20 kop.